

わだち掘れに影響する因子と対策の方向

報告者 阿部 頼 政

3 わだち掘れに影響する因子と対策の方向

阿部 頼 政

日本大学理工学部助教授

盤の種類

3-1 わだち掘れに影響する因子

本節では、アスファルト混合物の粘弾性的な性質を軸として、基礎的な考察を察することにより、わだち掘れに影響する因子を一覧する。また、影響因子のうち特に重要な交通荷重と温度については、欧米諸国の環境と比較しながら、これらをわが国で流動によるわだち掘れが著しく発生する原因として検討を加える。

3-1-1 わだち掘れに影響する因子

わだち掘れに影響する因子は、アスファルト混合物そのものの性質に起因する言わば内的因子と、混合物に作用する外からの力に起因する言わば外的因子とに分類できる。

内的因子は混合物を構成する材料とその配合設計を中心とするものであり、次の項目があげられる。

- ① アスファルト…… 硬さ、感温性
- ② 骨材 …… 硬さ、きめの粗さ、角ばり
- ③ 配合設計 …… 骨材粒度、アスファルト量

これらの因子は、一般に混合物にしたときの変形に対する抵抗性によってその良否が判定される。

外的因子としては次のものがあげられる。

- ① 交通荷重…… 交通量、大型車混入率、接地圧
- ② 幾何構造…… 道路幅員、車線分離
- ③ 舗装構造…… アスファルト層の厚さ、路

- ④ 温度……… 舗装体温度の変化

- ⑤ その他……… 交通渋滞、交差点付近など

3-1-2 アスファルト混合物の粘弾性的性質

コンクリート舗装にはわだち掘れがほとんどなく、アスファルト舗装にはわだち掘れがつきものである。これは、コンクリートが硬くアスファルト混合物がそれに比べて軟らかいという簡単な理由づけでは説明できない。スポンジのような軟らかい材料で舗装をつくったとしても多分わだち掘れはできないと思われるからである。

わだち掘れに関して、コンクリートとアスファルト混合物の根本的な違いは、前者は弾性的材料であり後者は粘弾性的材料であることから説明できよう。すなわち、コンクリートは荷重が作用すれば一時的に変形するが、荷重を取り去れば瞬間的に元の状態に戻るのに対し、アスファルト混合物では荷重を取り去った後、徐々に元の状態に戻ろうとするが、回復しきれない永久変形がわずかに残るのである。したがって、コンクリートの場合、荷重が何万回作用しようと変形はほとんど残らないが、アスファルト混合物ではわずかの永久変形が積み重なり、目に見える変形となって現われてくる。これがわだち掘れである。

アスファルトおよびそれを結合材として使用したアスファルト混合物の材料学的研究は、これらを粘弾性体として取り扱う方法が主流を占めてきた。わだち掘れの発生原因とその対策を

検討するには、粘弾性体の基本的な考え方が大いに参考になるので、ここに簡単なモデルを通して紹介したい。

(1) 粘弾性論の基本法則

粘弾性体の解析に最も基礎となる法則は、弾性体に関するフックの法則と粘性流体に関するニュートンの法則である。両者は、土木工学の基礎学問である応用力学と水理学の基本法則であるから、初めて接するという人は少ないかと思うがここで簡単にまとめておく。

いま、長さ l (cm)、断面積 A (cm²) の弾性体を力 P kgで引っ張ったとする (図3-1)。

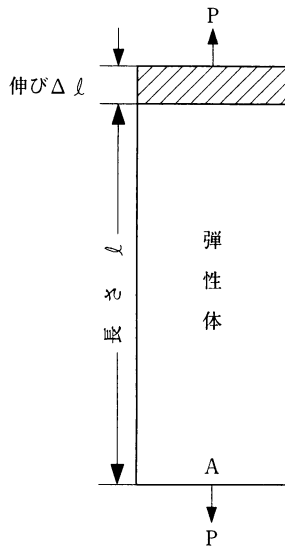


図3-1 フックの法則

このときの伸びを Δl とすれば、 Δl の小さい範囲では次のような比例関係が成立する。

$$P/A : \Delta l / l = E \quad \dots\dots(1)$$

応力 σ (kg/cm²) を P/A 、歪 ε を $\Delta l / l$ であらわせば

$$\sigma = E \varepsilon \quad \dots\dots(2)$$

と書ける。これがフックの法則である。ここで比例定数 E はヤング係数、ヤング率、縦弾性係数などと呼ばれ、各物質についてほぼ一定であるため、固体の力学的性質を表現する最も一般的な指標となっている。

一方、液体の場合は、固体のように供試体を作製して圧縮や引張りの試験を行うわけにはいかない。液体に外力が作用すれば、その外力を

取り去らない限り変形しつづける。つまり流動が起る。したがって外力に対する変形の大きさで液体を特徴づけることはできない。しかし、外力の大きさによって変形する速度は異なる。次に述べるように、液体の特徴づけは、外力とこの変形速度の関係で表わされるのである。

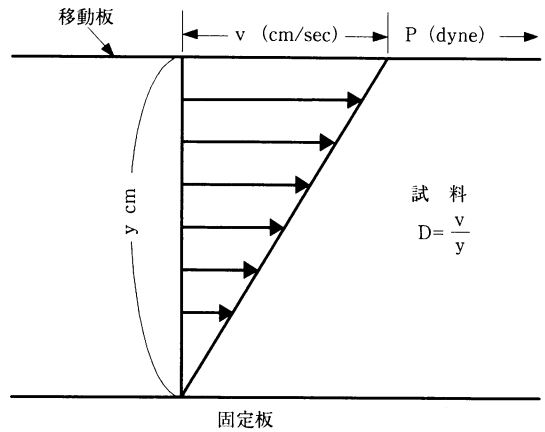


図3-2 粘性流動

図3-2で、2枚の平行板の間に液体が満たされており、下方の板を固定して上方の板を一定の力 P (dyne) で右方に引っ張る場合を考えよう。2枚の平行板間の距離を一定にし、板と液体が完全に密着して滑らないとすれば、上の板のそばの液体は板とともに動き、下の板のそばの液体は動かないで止まっているから、その間の液体は図のように少しずつ動き方が異なるはずである。

液体間には粘性抵抗 (内部摩擦) があるため、上方の板の速度 v (cm/sec) は無制限に大きくなることはなく一定の速度で動き続ける (定常状態という)。この速度 v を平行板間の距離 y (cm) で割った値、すなわち単位距離あたりの流速の変化量 D (1/sec) は一般に速度勾配とかせん断速度等の名で呼ばれている。

$$D = v / y \quad \dots\dots(3)$$

また、単位面積あたりの力すなわちせん断応力を τ (dyne/cm²) であらわせば

$$\tau = P / A \quad \dots\dots(4)$$

となる。普通の状態の水などでは、この速度勾

配Dとせん断応力 τ は比例し、次の式で書きあらわせる。

$$\tau = \eta D \quad \dots\dots(5)$$

この比例定数 η が粘度と呼ばれているものであり、(5)式であらわされる関係がニュートンの法則である。

粘度 η の単位は、粘性抵抗の研究における先覚者、フランスのPoiseuilleの名をとりPoiseが使われている。ここで1 Poiseの粘度とは、 $y = 1$ (cm), $v = 1$ (cm/sec), したがって $D = 1$ (1/sec) のとき、 $\tau = 1$ (dyne/cm²) になるような場合をいう。Poiseの次元は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{Poise} &= \text{dyne} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}) = \\ &= \text{g} / (\text{cm} \cdot \text{sec}) \quad \dots\dots(6) \end{aligned}$$

このPoiseで表示した粘度がいわゆる絶対粘度であり、20℃の水の粘度が1 centi-poise (1/100poise) であることを記憶しておく、アスファルトなど他の材料の流れ難さが理解できよう。

なお、絶対粘度を液体の密度 ρ (g/cm³) で除した値を動粘度と呼び、単位はstokesを使用する。

$$\begin{aligned} \text{stokes} &= \text{Poise} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ &= \text{cm}^2 / \text{sec} \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

アスファルト舗装要綱に関して述べれば、石油アスファルトの高温時(120℃, 140℃, 160℃, 180℃)の粘度は動粘度で、セミブローンアスファルトの60℃粘度は絶対粘度で表示するようになっている。

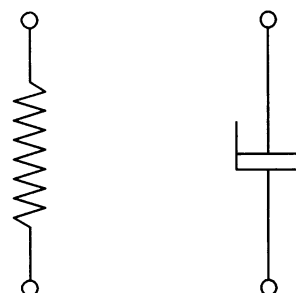
最後にフックの法則とニュートンの法則をまとめて表3-1に示す。

表3-1 二つの法則の対応関係

弾性体	粘性流体
フックの法則	ニュートンの法則
$\sigma = E \varepsilon$	$\tau = \eta D$
応力 σ	せん断応力 τ
歪 ε	せん断速度 D
ヤング率 E	粘度 η

(2) 粘弾性モデルの基本要素

粘弾性論は、フックの法則とニュートンの法則をそれぞれ図3-3(a)(b)のようにモデル化することから出発する。



(a) 弾性要素 (b) 粘性要素

図3-3 モデルの要素

(a)でバネのヤング率をEとし、歪を ε とすれば、応力 σ は、

$$\sigma = E \varepsilon \quad \dots\dots(8)$$

であらわされる。一方、(b)のダッシュポットは、油のような粘性の高い液体を満たしたシリンダーの中をピストンが動くような仕掛けにモデル化したものである。この場合、外力が加わるとそれがどんな小さな力でもピストンは移動を始めるが、逆にどんな大きな力が加わっても、ピストンは瞬間的には移動できず、一種の制動器の働きをする。そして、ピストンの移動速度と外力の間にはニュートンの法則が成り立つとするのである。すなわち、ダッシュポットは、それにかかる応力を σ 、ひずみ速度を $d\varepsilon/dt$ 、粘度を η としたとき、次の式が成立するようなモデルである。

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \dots\dots(9)$$

ここで、前に使用した τ , D に代えて σ , $d\varepsilon/dt$ を使用するのは、若干問題はあるが、以後の説明が理解し易いようにあえてこれらの記号を使用する。

以上の2つの要素を組合せた最も単純なモデルは、図3-4(a)のように直列につないだも

のと、図3-4(b)のように並列につないだものになる。前者はマックスウエルモデル(Maxwell Model)、後者はフォークトモデル(Foigt Model)と呼ばれている。

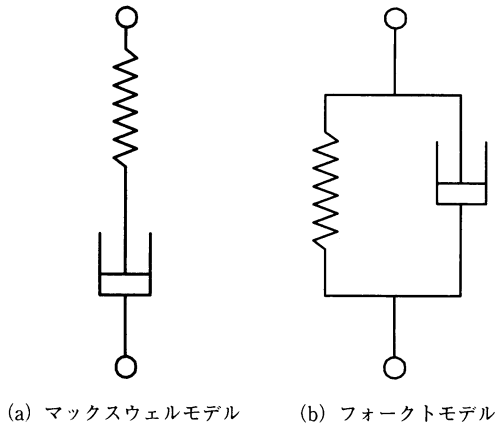


図3-4 二要素のモデル

アスファルト混合物のような実在の物質が、これらの簡単なモデルでその力学的性質を完全に表わせるというわけにいかないことは勿論であるが、わだち掘れのような変形はこれらのモデルで考えると理解し易い。

(3) マックスウエルモデル

マックスウエルモデルに一定の引張応力 σ_0 を与えると、図3-5(b)のようにバネは瞬間的に伸び、歪はフックの法則にしたがって、 σ_0/E となる。ダッシュポットは瞬間的には変形できないが、荷重直後から変形をはじめ時間に比例して歪が増大する。時刻 t_1 で応力を除去すると、バネはまた瞬間的に元の長さに戻るが、ダッシュポットはそのまま動かない。結果的には、ダッシュポットが荷重中に変形した歪 $\sigma_0 t_1 / \eta$ だけ永久変形として残る。図3-5(d)はこの間の $\epsilon - t$ の関係を示したものである。

以上は、バネとダッシュポットの基本的性質から歪の変形を考察したものであるが、次に数式からこの現象をとらえてみよう。

前に示したフックの法則とニュートンの法則をもう一度書き直すと、

$$\text{バネ: } \epsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \quad \dots\dots(10)$$

$$\text{ダッシュポット: } \frac{d\epsilon_2}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad \dots\dots(11)$$

ここで、 ϵ_1 、 ϵ_2 はそれぞれバネとダッシュ

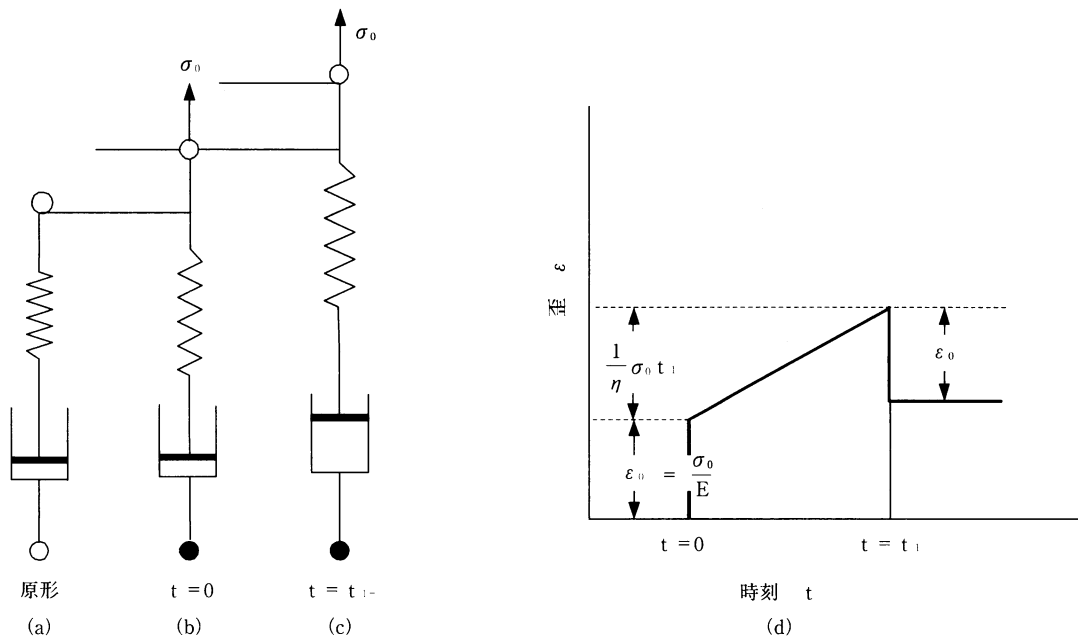


図3-5 マックスウエルモデルの粘性流動

ポットの歪であるが、マックスウエルモデルでの全歪はこの2つの和としてあらわされる。すなわち、

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

両辺を時間 t で微分すると

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式(10)の両辺を t で微分すれば

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式(11)と式(14)を式(13)に代入すれば

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \dots\dots\dots(15)$$

式(15)はマックスウエルの基礎方程式と呼ばれるものである。

ここで載荷時間がごく短い場合、 $d\sigma/dt$ に比べて σ/η が無視できるとすれば上式は次のように書ける。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad \dots\dots\dots(16)$$

両辺を積分して初期条件 $\varepsilon = 0$ で $\sigma = 0$ を代入すれば

$$\sigma = E\varepsilon \quad \dots\dots\dots(17)$$

となる。つまり、瞬間的な載荷に対してはマックスウエルモデルは弾性的な挙動をするわけである。

逆に緩慢な載荷に対してはどうであろうか。この場合は、式(15)で $d\sigma/dt$ が非常に小さくなるので、これを σ/η に比べて無視できるとすれば、

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad \dots\dots\dots(18)$$

となる。これは粘性流動のニュートンの法則である。つまり緩慢な変形に対して、マックスウエルモデルは液体のような挙動をするわけである。

以上のようなモデルの考察を、アスファルト混合物の流動という立場から判断すれば、車両が高速で走行する（載荷時間が短い）場所では流動が起りにくく、車両が低速で走行す

る（載荷時間が長い）場所、すなわち、渋滞区間や交差点付近では流動が起り易いということになる。

(4) フォークトモデル

フォークトモデルにおいて、いま時刻 $t = 0$ で一定の引張応力 σ_0 を加え、しばらくそのまま保ち、時刻 $t = t_1$ で応力を除去したとしよう（図3-6）。

時刻 $t = 0$ で応力がかかった瞬間、バネは伸びようとするが、ダッシュポットと並列につながれているためこれに制動され、マックスウエルモデルのように瞬間的な弾性変形をすることはできない。一方、ダッシュポットの方は、応力 σ_0 がかかった瞬間から $d\varepsilon/dt = \sigma_0/\eta$ なる粘性流動を起そうとする。しかし、ダッシュポットが $\Delta\varepsilon$ 変形したときには、バネもそれに伴って伸びているため応力の一部 $\sigma_1 = E \cdot \Delta\varepsilon$ はバネが受けもつことになり、ダッシュポットにかかる応力 σ_2 は $\sigma_0 - \sigma_1$ に減少する。したがってダッシュポットの伸びる速度も遅くなる。この相互作用を繰り返していくと、 σ_1 は次第に大きくなって σ_0 に近づき、 σ_2 は次第に小さくなってゼロに近づいていく。これに伴って全歪 ε は σ_0/E に限りなく漸近する。この様子を図3-6(d)に示した。

時刻 t_1 で応力を除去すると、バネはそれまでに伸びた分だけ元に戻ろうとする。しかし、この場合もダッシュポットが制動し、前と同じような相互作用を繰り返しながら全歪は限りなくゼロに近づいていき、無限時間後に元の状態に戻るようになる。

次に基礎方程式を誘導してこれらの様子を考察してみよう。フォークトモデルの場合、与えられた応力はバネとダッシュポットが分担して受け持つ。すなわち、それぞれの分担する応力を σ_1 、 σ_2 とすれば

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad \dots\dots\dots(19)$$

また、 σ_1 、 σ_2 はそれぞれフックの法則、ニュートンの法則にしたがうから

$$\sigma_1 = E\varepsilon \quad \dots\dots\dots(20)$$

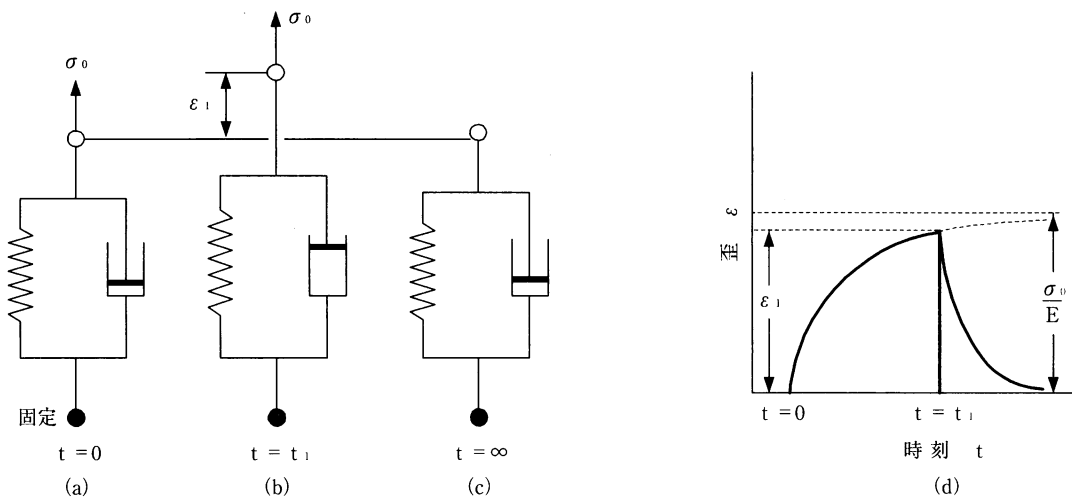


図 3-6 フォークトモデルのクリープ

$$\sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \quad \dots\dots\dots(21)$$

これらを式(19)に代入すれば

$$\sigma = E \epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad \dots\dots\dots(22)$$

これがフォークトモデルの基礎方程式である。この例のように一定応力 σ のもとでは

$$\sigma_0 = E \epsilon + \eta \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \quad \dots\dots\dots(23)$$

と書いて、 $t = 0$ で $\epsilon = 0$ の初期条件を入れれば、解は次のようになる。

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-\frac{E}{\eta} t}) \quad \dots\dots\dots(24)$$

この式が図 3-6(d)の曲線の左半分をあらわしている。

以上のような、一定応力のもとにおける歪の時間的変化はグリープと呼ばれている。

次に、時刻 t_1 で応力を除去したとすると、その後の挙動は式(22)に $\sigma = 0$ を代入して

$$E \epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots(25)$$

が得られる。この解は次のとおりである。

$$\epsilon = \epsilon_1 e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad \dots\dots\dots(26)$$

この式で t のかわりに $t - t_1$ を代入すれば、図 3-6(d)の右半分の曲線が得られる。この場合も歪は瞬間的に戻るのではなく、指数関数的に減少し、無限時間後にゼロになる。後半の現象は変形がもとに戻るからクリープ回復と呼ばれている。

(5) 4要素モデル

マックスウエルモデルとフォークトモデルは、それぞれ独自の特徴を備えているため、粘弾性体の簡単な考察にはよく利用されている。アスファルト混合物の挙動は両者の特徴を兼ね備えているとされており、3要素以上のモデルによって説明されることが多い。バネとダッシュポットの3個以上の組合せは、種々考えられるが、ここでは最も広く利用される図 3-7(a)のモデルについて考察しよう。

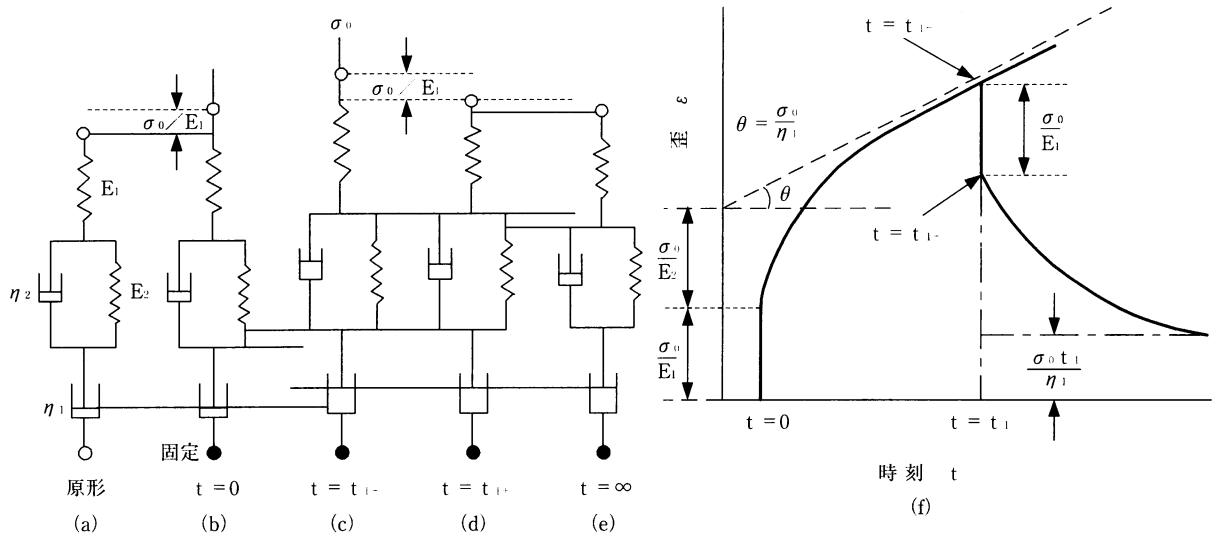


図 3 - 7 四要素モデルのクリープ

図のモデルにいま時刻 $t = 0$ で一定応力 σ_0 を与えると、マックスウエルモデルの部分（マックスウエル要素という）のバネは、瞬間的に $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E_1$ だけ伸びるが、ダッシュポット η_1 とフォークト要素は伸びることができない (b)。しかし、時刻が移ると η_2 とフォークト要素も伸び始め、 $t = t_1$ では $E_1 \cdot \eta_1$ とフォークト要素の伸びの合計が ε としてあらわれる (c)。この場合、フォークト要素の伸びは一定値 σ_0 / E_2 に限りなく近づくが、 η_1 は応力が働いている限り伸び続けるので、全体の伸びは (f) の点線で示した斜線に漸近する。

時刻 t_1 で応力を除去すると、次の瞬間 ($t = t_1 +$)、 E_1 のバネは元に戻る。時刻が移るとフォークト要素が元に戻り始め、無限時間後には η_1 による永久変形 $\sigma_0 \cdot t_1 / \eta_1$ だけが残ることになる。

(6) わだち掘れに影響する因子

粘弾性モデルから見て、わだち掘れに影響する項は 1 回の载荷で永久変形として残る $\sigma_0 \cdot t_1 / \eta_1$ である。すなわち、永久変形は σ_0 と t に比例し、 η_1 に反比例する。それぞれの因子について考察してみよう。

σ_0 : モデルに作用した応力である。すなわち、交通荷重の接地圧と見ることができ、モデルは二次元的な考察であるから、実際にはこれに面積を乗ずることによって得られる荷重の大きさも影響因子となる。

t_1 : 载荷時間である。モデルで考察したように瞬間的な载荷に対しては弾性変形をして永久変形が残らないため、車輛が高速で走行している場合にはわだち掘れが生じにくい、渋滞、信号等で車輛の停止があると载荷時間が長くなり、わだち掘れが生じやすくなる。

η_1 : モデルでは単にダッシュポットの粘度であったが、実際の舗装で考えればこれはアスファルト混合物の粘性抵抗成分である。すなわち、混合物の変形に対する抵抗性で、骨材の性質、粒度、アスファルトの質と量など、様々の因子が複雑にからみあって抵抗性に影響する。なお、アスファルトの硬さが温度によって大きく変化するため、温度が極めて重要な因子となる。

以上の考察結果をさらにわだち掘れに影響する内的因子と外的因子に分けて整理してみよう。

まず内的因子には、混合物の変形抵抗性に影響する因子がすべて含まれてくる。すなわち、骨材やアスファルトの質、量などの変化は、混合物の変形抵抗性にいかなる影響を与えるかによって評価される。したがって、これらの各因子の変化を混合物の変形抵抗性として、さらにはわだち掘れに対する抵抗性としてとらえることのできる力学試験が必要となる。このような混合物の評価試験については、3-2で述べることにする。

外的因子は一般に人為的に調整できないものが多い。わが国で特に流動が激しい理由は、これらの調整できない因子が海外に比べて流

動を促進させる状態にあるからと考えられる。以下、その中でも特に重要と思われる交通荷重、温度の影響について検討する。

3-1-3 交通荷重の影響

交通荷重がわだち掘れの元凶であることはいうまでもない。これを混合物の流動という面からみれば、粘弾性モデルで考察したように荷重の大きさ、頻度、載荷時間が重要な因子であり、実際の交通荷重という面からみれば、大型車交通量、車両走行位置の集中度、車両走行速度などが対応する。以上の問題については多田³⁾が非常によくまとめているので、これを基に考察する。

表3-2は、わが国の交通荷重の苛酷さを自動車保有台数などから解析した結果である。³⁾ まずD欄の大型車混入率でわが国の交通は大型車

表3-2 自動車保有台数と走行台キロ

国名	舗装延長 A 千km	自動車保有台数 B 千台	大型車台数 C 千台	D = C / B %	E = B / A %
アメリカ	5,169	154,118	33,870	22.0	29.8
西ドイツ	419	24,769	1,533	6.1	59.1
イギリス	340	16,951	1,878	11.1	49.9
フランス	738	21,780	2,650	12.2	29.5
日本	178	37,874	14,214	37.5	212.8

国名	F = C / A 台/km	年間総走行 台 キロ G億台キロ	H = G × D 億台キロ	I = H / A 百万台
アメリカ	6.6	24,250	5,335	10.3
西ドイツ	3.7	3,259	199	4.7
イギリス	5.5	2,774	308	9.1
フランス	3.6	3,030	370	5.0
日本	79.9	4,380	1,640	92.1

(注) 1. IRF Edition 1981による。ただし、日本は道路統計年報1981および建設省道路局資料による。

2. 日本の舗装延長欄 市町村道も含む全道路（簡易舗装を除く）

の占める割合が極めて高いことがわかる。また、大型車保有台数を舗装延長で除したF欄から、わが国の舗装は欧米諸国の10倍程度に相当する荷重にさらされていることが推定される。これは単純に考えても、欧米諸国で10年供用できる舗装がわが国では1年しか供用できないことを

意味するが、わだち掘れの促進という面からみれば、間断のない荷重はクリープ回復を損う可能性があり、さらに厳しい条件になっているといえよう。舗装延長と大型車総走行台キロとの関係からも、わが国の荷重密度は欧米諸国のほぼ10倍という数字がでてくる。

表3-3 車道幅員の比較

国名	道路種別	延長	km	割合%	年次
アメリカ	連邦補助 一級道路	総延長	416,750	100	1,978
		うち幅員 7.3m以上	335,489	80.5	
西ドイツ	連邦道路	総延長	32,490	100	1,976
		うち幅員 7m以上	21,420	65.9	
フランス	国道	総延長	29,104	100	1,977
		うち幅員 7m以上	22,380	76.9	
日本	一般国道	総延長	39,946	100	1,980
		うち幅員 7.5m以上	6,521	16.3	

- (注) 1. 資料出所 アメリカ：「Highway statistics 1978」
西ドイツ：「Venkehr in Zahlen 1978」
フランス：「Annuaire Stat ist igue pes Transport 1978」
日本：「昭和55年度全国道路交通情勢調査」
2. 各国とも高速道路を除いてあり、一部推計を含む。
3. 幅員7mの道路とは、大型車が楽にすれちがえる道路である。

表3-4 幹線道路の混雑状況

道路種別	混雑度別延長 km					走行台キロ (千台キロ)		
	全延長	0.5以上	0.8以上	1.0以上	1.5以上	総走行台 キロ A	混雑区間 走行台キロ B	B/A (%)
一般国道	39,946 (100)	27,111 (68)	18,003 (45)	12,677 (32)	4,394 (11)	284,843	156,371	55
都道府県道	130,166 (100)	79,074 (61)	54,644 (42)	44,208 (34)	28,084 (22)	322,622	147,689	46
計	170,112 (100)	106,185 (62)	72,647 (43)	56,885 (33)	32,478 (19)	607,465	304,060	50

- (注) 1. 昭和55年度全国道路交通情勢調査による。
2. 混雑区間走行台キロは、混雑度1.0以上の区間における走行台キロを示す。
3. 混雑度1.0とは、交通量が道路の交通容量に等しい状態をいう。
4. 混雑度1.0~1.5の場合は、朝夕のピーク時間を中心に渋滞が生じ、混雑度1.5以上の場合、1日中渋滞する。
5. () 内の数値は構成比 (%) である。

表3-3³⁾は道路幅員を比較したものである。わが国の道路が狭いことは明らかであるが、これは大型車の車輛を一定位置に集中させる働きをし、レーンマークによる車線規制の影響とあいまってわだち掘れを促進させる。

走行車輛の数が多く道路が狭ければ、当然のことながら交通渋滞が予想される。表3-4³⁾に明らかなように、わが国の幹線道路の33%にもほる区間が少なくとも朝夕のラッシュ時には渋滞している。渋滞の結果は載荷時間が永くなるという形で混合物の流動に影響する。

3-1-4 温度の影響

アスファルトの粘度は温度によって極めて大きく変化する。図3-8⁴⁾はアスファルトの粘度-温度関係の一例であるが、わが国の路面最高温度といわれている60℃における粘度は、常温25℃における粘度のほぼ100分の1になっている。粘度は前にも述べたように流れにくさを示す指標であり、このように混合物に敏感なアスファルトを使用している混合物の流動抵抗性は、やはり温度に大きく左右されるはずである。

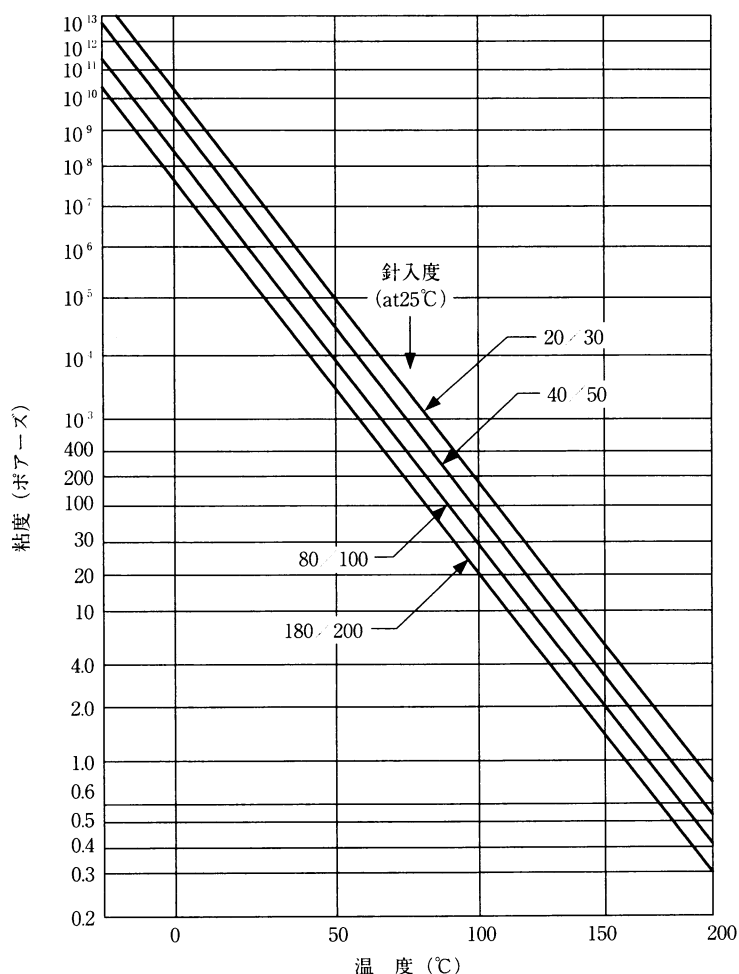


図3-8 粘度温度関係 (R. R. L.)

図3-9は、東京の日最高気温を、1981年および1951~1980年の平均で示したものである。1981年は例年に比べて若干、温度が低かったようであるが、30年間の平均でみると、1箇月のうち23日間は連続して30℃を超えている。

表3-5には、1981年6月~9月、122日間のデータをロンドン、パリ、サンフランシスコなどの主要都市と比較して整理した。わが国の気温はかなり高く、しかも高温が連続するという特徴がある。

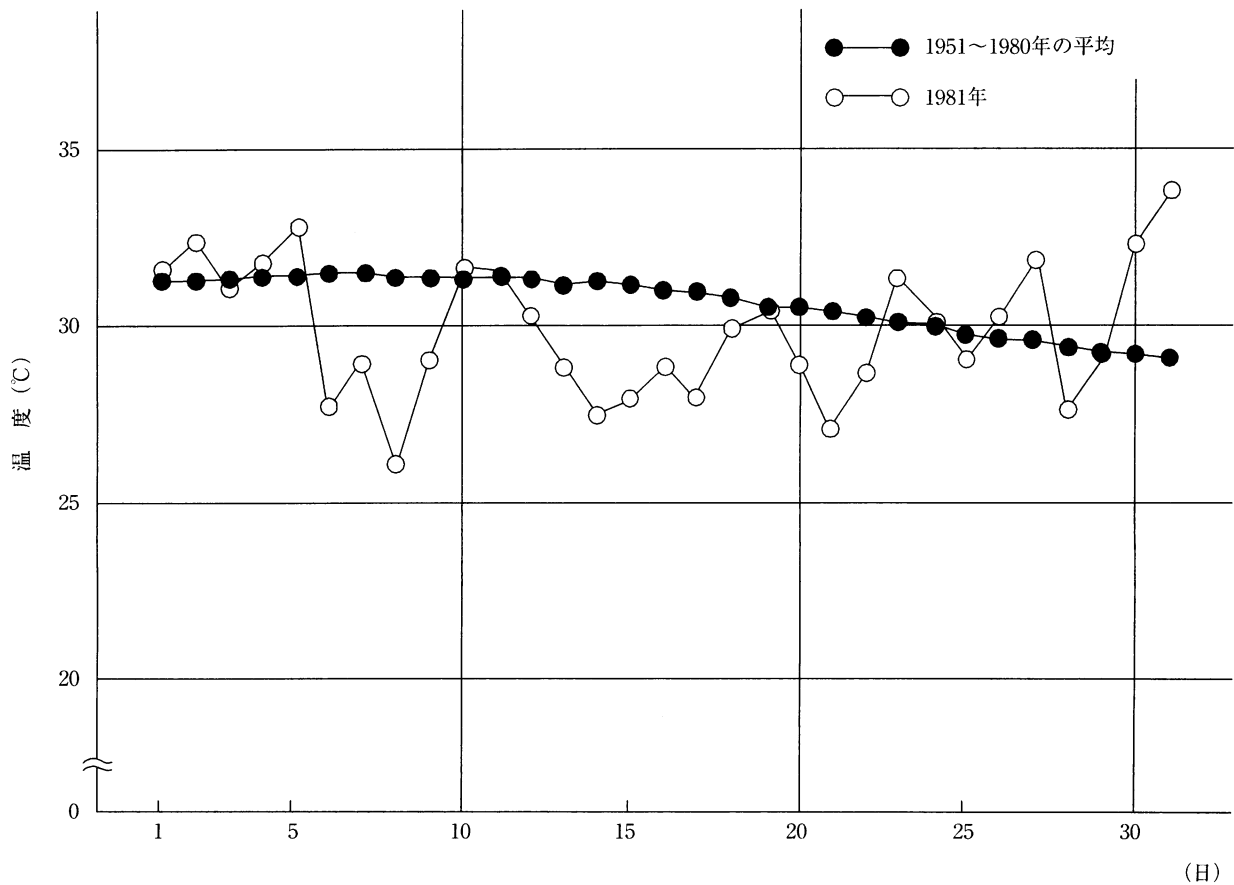


図3-9 東京の8月における日最高気温

表3-5 各国の気温状況

	20℃以上の 日数(%)	25℃以上の 日数(%)	30℃以上の 日数(%)	20℃以上が 連続する日数	25℃以上が 連続する日数	30℃以上が 連続する日数
ロンドン (1981年)	68 (55.7)	16 (13.1)	1 (0.8)	11	5	1
パリ (1981年)	96 (78.7)	30 (24.6)	9 (7.4)	33	9	2
サンフランシスコ (1981年)	40 (32.8)	15 (12.3)	1 (0.8)	9	6	1
東京 (1981年)	117 (96.0)	81 (66.0)	41 (34.0)	100	63	16
東京 (1951~1980年)	122 (100)	106 (87.0)	34 (28.0)	122	106	34

- (1) 6月～9月までの122日間の気温状況である。
- (2) 上段のロンドン、パリ、サンフランシスコ、東京は、1981年の日最高気温を示している。
- (3) 最下段の東京は、1951～1980年の30年間の最高気温の平均を示している。
- (4) ロンドン、パリ、サンフランシスコは朝日新聞で、東京は気象庁で調べたものである。

3-2 耐流動混合物の評価の考え方

前節で考察したように、アスファルト混合物の流動は、混合物の力学的抵抗性のうち粘性的な成分に支配される。一般にアスファルト混合物のような弾性体は、荷重を除去すれば変形が元に戻る弾性的成分と、変形が元に戻らない粘性的成分に分けて解析されることが多いが、このうち粘性的成分をある程度評価できる既存の試験法には次のようなものが考えられる。

- ① マーシャル試験
- ② クリープ試験
- ③ 繰返し三軸圧縮試験
- ④ ホイールトラッキング試験

以上のうち、②と③は海外の研究者の主要な測定法となっているが、わが国ではあまり普及しておらず、ごく一部の研究者が使用しているにすぎない。装置の複雑さ、実験データの解析の難しさ、さらには高価なことを考えれば、耐流動混合物の評価にこれらの試験法を広く利用するのは現段階では無理であろうと判断される。

①のマーシャル試験は、試験機が広く普及していること、混合物の高温安定性を示す指標とされていることなどから、耐流動性の簡単な判定法として使用されているが、マーシャル安定度あるいはマーシャルスティフネス（安定度／フロー値）と現場試験との対応があまり明確にされていないきらいがある。また、載荷速度の速い、ただ1度の載荷試験の結果から、何百万回の載荷により発生する流動の判定ができるかという疑問が残る。

以上の3種類の試験法に比べ、④のホイールトラッキング試験は、耐流動性の判定に現時点では最も有望な手法であると考えられる。試験機を所有している機関、研究所も年々増加し、実験データも徐々に蓄積されつつある。

図3-10は、建設省の行なった幕張試験舗装のわだち掘れと動的安定度の関係である⁵⁾。両者の関係はかなり相関が高く、動的安定度が高い程、わだち掘れが小さくなる傾向がはっきりあらわれているので、ホイールトラッキング試験により混合物の耐流動性を判定できると結論できる。

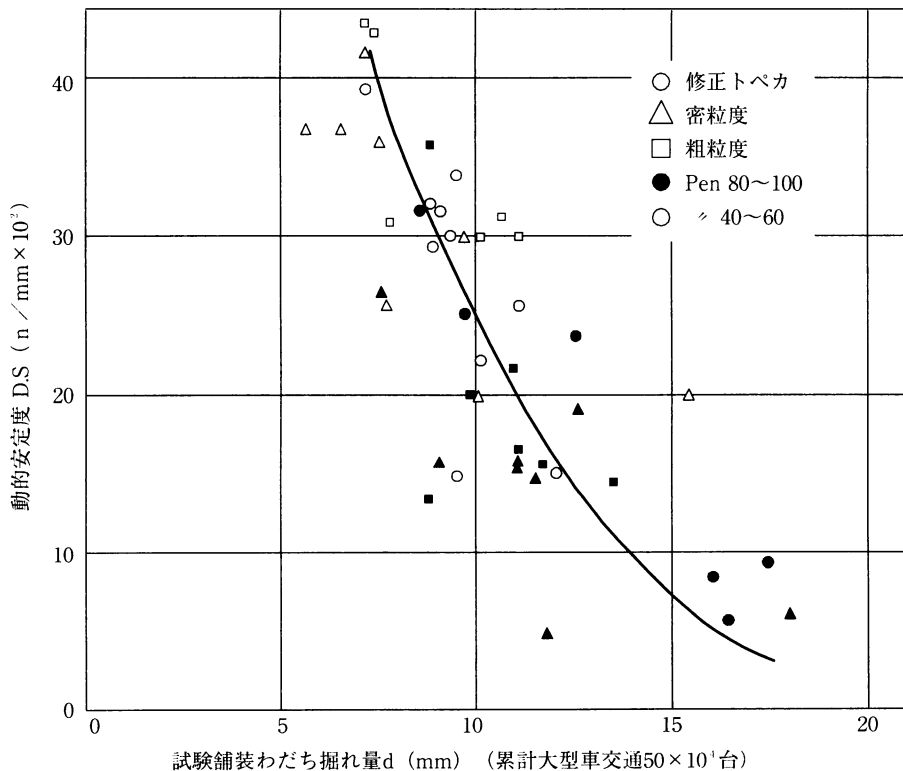


図3-10 D. Sとわだち掘れ量の関係

このように現場試験と室内試験の関係が得られれば、耐流動性に富む混合物の作製、すなわち骨材やアスファルトの選択、両者の配合設計はかなり容易になる。なぜなら、この場合、影響因子種々に変えて動的安定度の高い混合物を作製するだけで実舗装での耐流動性が保障されているからである。現場試験に比べれば室内のホイールトラッキング試験は極めて簡単な試験であるといっても過言ではなからう。

動的安定度とわだち掘れの関係が得られたため、耐流動混合物の検討は、動的安定度の高い混合物の検討に置き換えられる。表3-6は、耐流動性

に影響すると思われる材料的因子と動的安定度の大小を実験的に調べた結果である^{3), 6)}。

この表の主要な結果をまとめると、動的安定度を高く、したがって耐流動性を高めるには次のような設計が望ましいといえる。

- ① アスファルト量をOACより少なくする。
- ② 硬いアスファルトを使用する。
- ③ 骨材粒度を粗く、粗骨材量を多くする。

一方、塑性流動抵抗係数 (Pfr = 累計大型車数 / 塑性変形量) という指標で、耐流動性に影響する因子の検討を行なった例^{3), 5)}でも上記①, ②, ③と全く同様の結果が得られている (表3-7)。

表3-6 ホイールトラッキング試験による動的安定度との要因効果

要 因	大 ← D S → 小		要 旨
アスファルト量	少	多	(OAC-0.3) %が有効
アスファルト針入度	小	大	80/100より40/60が有効
粒 度	粗	密	粗粒, 密粒, 細粒の順で有効
粗 骨 材 料	多	少	チップングなどの処理が有効, チップは5号がよい
セメント・消石灰	多	少	フィラーの一定量使用, 消石灰は25%以内で多い量が有効
樹 脂 ・ ゴ ム	多	少	NR, SBR, EVA, EEAなどをアスファルトに一定率使用
骨 材 温 度	高	低	効果的な締固め度を得る条件として有効

表3-7 塑性流動抵抗係数との要因効果

要 因	小 ← P fr → 大		要 旨
イ) 2.5mm通過量	大	小	細粒度アスコン, 密粒度アスコンよりも粗粒度アスコンが有効
ロ) アスファルト計入度	大	小	80/100より40/60が有効
ハ) 0.6mm通過量×アスファルト針入度の交互作用	小×大	大×小	0.6mm通過量が大きと同時に針入度小が有効
ニ) 0.074mm通過量×アスファルト量の交互作用	小×大	大×小	0.074mm通過量が大き, アスファルト量が少ない方が有効
ホ) アスファルト量×針入度の交互作用	大×大	小×小	40/60で(OAC-0.3) %が80/100でOACより有効
ヘ) アスファルト量	大	小	(OAC-0.3) %が有効
ト) 2.5mm通過量×骨材の種類 の交互作用	大×玉砕	小×砂岩	砂岩で粗粒度アスコンが有効
チ) 0.6mm通過量×アスファルト量×針入度の交互作用		小×大×小	アスファルト量が少なく, 0.6mm通過量が大き同時に針入度小のものが有効

以上の考察により、耐流動混合物の評価にはホイールトラッキング試験が適当であること、耐流動混合物を作製するには、硬いアスファルトを少く使用し、粗骨材を多くするのが有効であることが明らかとなった。

しかし、ここで注意しなければならないのは、上記のような条件はすべてひびわれを助長する方向にあるということである。図3-11は東京都内

の重交通道路において路面性状を調査し、オーバーレイ等の修繕を要する $PSI \leq 2.0$ の個所のわだち掘れ量とひびわれ率をプロットしたものであるが⁷⁾、全体的に見ると、ひびわれが少なればわだち掘れが多く、わだち掘れが少なればひびわれが多いという関係になっている。したがって、耐流動混合物の作製もひびわれと十分にバランスをとりながら考える必要があるといえよう。

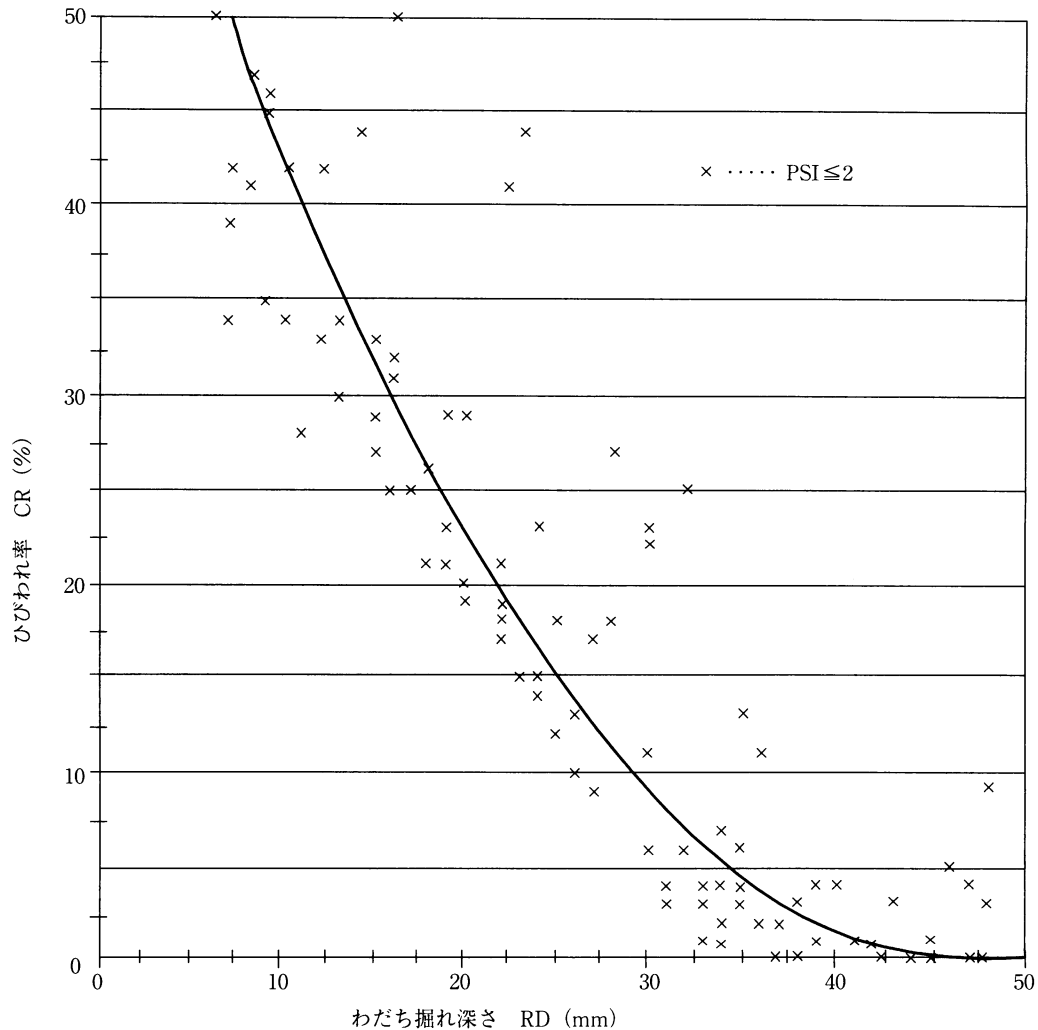


図3-11 ひびわれとわだち掘れの対立関係

3-3 わだち掘れ量の予測と対策の方向

これまで、わだち掘れに影響する因子、混合物の評価法を検討してきたが、海外ではこれらの問題にそれぞれの手法で解決をつけ、実際に生ずるわだち掘れを予測しようとする研究が盛んである。

本節では、代表的な予測法を紹介して各因子のとりえ方を整理するとともに、わだち掘れ対策の新しい方向をさぐってみたい。

3-3-1 シェルのわだち掘れ予測法

海外で発表されているわだち掘れ予測法は数多くあるが、その大部分は路床あるいは各層の

圧密沈下をわだち掘れとするもので、混合物の流動に関する予測法は少ない。しかし後者のうち、極めてまとまった形で発表されたシェルの舗装設計法⁸⁾は注目に値する。筆者はアスファルト誌にその内容を紹介したが⁹⁾、詳細は同誌あるいは原書を見ていただくとして、ここではわだち掘れに影響する因子のとらえ方を中心に考察する。

(1) 基本的な考え方

わだち深さの予測における基本的な考え方あるいは根本的な仮定ともいうべきものは「アスファルト混合物の永久変形は、アスファルトのステイフネスの粘性流動成分に関係がある」とするものである。この粘性流動成分は、次の式で与えられている。

$$(Sbit) v = \frac{3}{\sum_{T, t} \left(\frac{W t}{\eta} \right)} \quad \dots\dots\dots(27)$$

ここに (Sbit) v : 粘性流動成分

- W : 通過輪数
- t : 一輪の通過に要する時間
- T : 温度
- η : アスファルトの粘度 (N/m²)

式(27)の誘導過程は省略するが、モデルで考察したときの永久変形量 $\sigma_0 t_1 / \eta_1$ とよく似た形になっていることに注目したい。しかし、モデルにおける σ_0 、 t_1 、 η_1 は単純な量であったが、式(27)の W、t、 η は、舗装供用期間中の交通荷重、粘度の変動を取り入れるため、かなり複雑になる。これらについては後に検討する。

(Sbit) v が定まれば、クリープ試験の結果と従来の研究成果をもとに混合物のフティフネス S_{mix} を求めることができる。アスファルト混合物層の載荷による減少量 Δh は、この S_{mix} を利用して次式から求められる。

$$\Delta h = CM \cdot h \cdot \frac{\sigma_{av}}{S_{mix}} \quad \dots\dots\dots(28)$$

ここに CM : 修正係数、混合物によって

異なり、その値は 1 ~ 2 であることが経験的にわかっている。

h : アスファルト混合層の厚さ (mm)

σ_{av} : 走行荷重下における舗装内の平均応力 (N/m²)

式(28)は、形の上ではフックの法則に修正係数を乗じただけの単純な式である。しかし、 Δh を求めるために必要な W、 η 、 σ_{av} 、(t は t は 0.02 秒に固定している) を定量的に定めるのは種々の研究とテクニックを要する。

(2) 交通荷重について

現実の道路のように輪荷重が複雑に変化する場合、これを標準的な荷重に換算できれば便利である。シェルでは次の式を使用している。

$$W = 1.4 W_{tot} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^{1/s} \frac{n_i}{n_{tot}} \quad \dots\dots\dots(29)$$

ここに W : 標準輪荷重に換算した輪数

W_{tot} : 設計期間中の大型車輪数 (輪荷重は種々のもの)

σ_i : 輪荷重 i クラスの接地圧 N/m²

σ_0 : 標準輪荷重の接地圧, 6×10^5 N/m²

n_i : 輪荷重 i クラスの輪数

n_{tot} : 全輪数

S : クリープ試験から定められた $\log S_{mix} - \log S_{bit}$ 曲線の勾配

式(29)から明らかなように、標準輪荷重への換算は、混合物のクリープ特性が基礎になっている。

(3) アスファルトの粘度について

アスファルトの粘度 η はアスファルトの種類と温度によって変化する。このような温度と粘度の関係は、あらかじめ図 3-12 のような

チャートを作成しておくことにより、温度がわかれば粘度をすぐに求めることができる。実際の舗装ではアスファルト層の位置によっても温度が変わるため、シェルでは舗装表面か

ら、40mm、40mm、残った厚さの3層に分割して別々に粘度の影響を取り入れている。その手順を簡単に紹介しよう。

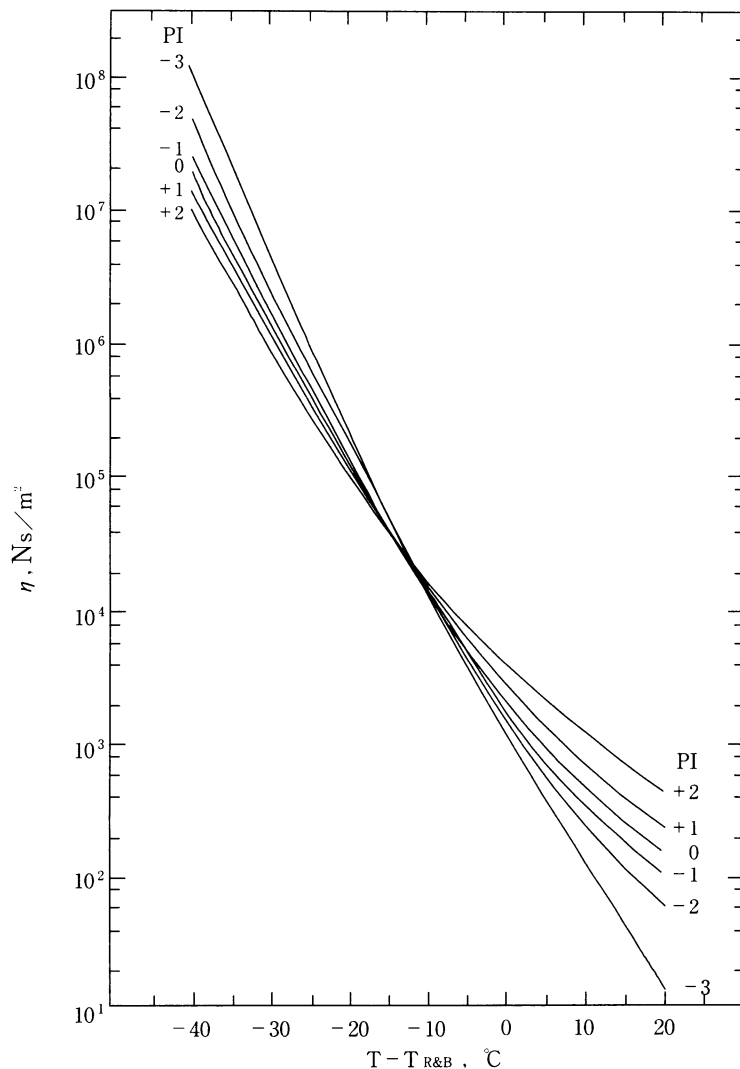


図3-12 粘度図 (Viscosity Chart)

Edwardsらの研究¹⁰⁾をもとに1日6回(1, 5, 9, 13, 17, 21時)の温度測定データから各層の粘度を得て、これを次式により、日平均粘度 η_i とする。

$$\eta_i = \frac{1}{\frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \frac{1}{\eta_j}} \text{ (Ns/m}^2\text{)} \dots\dots(30)$$

日平均粘度と月平均気温 (MMAT) との関係を図3-13のように得ておけば、各月の平均

気温を知ることにより、対応する12個の η_i が求められる。これを利用してさらに次式から年平均粘度 η_y を求める。

$$\eta_y = \frac{1}{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{1}{\eta_j}} \text{ (Ns/m}^2\text{)} \dots\dots(31)$$

以上のようにして求めた η_y が式(27)の η として使用される。粘度を年平均としてあらわしたため、式(27)の W も年間の交通量 W_y とする

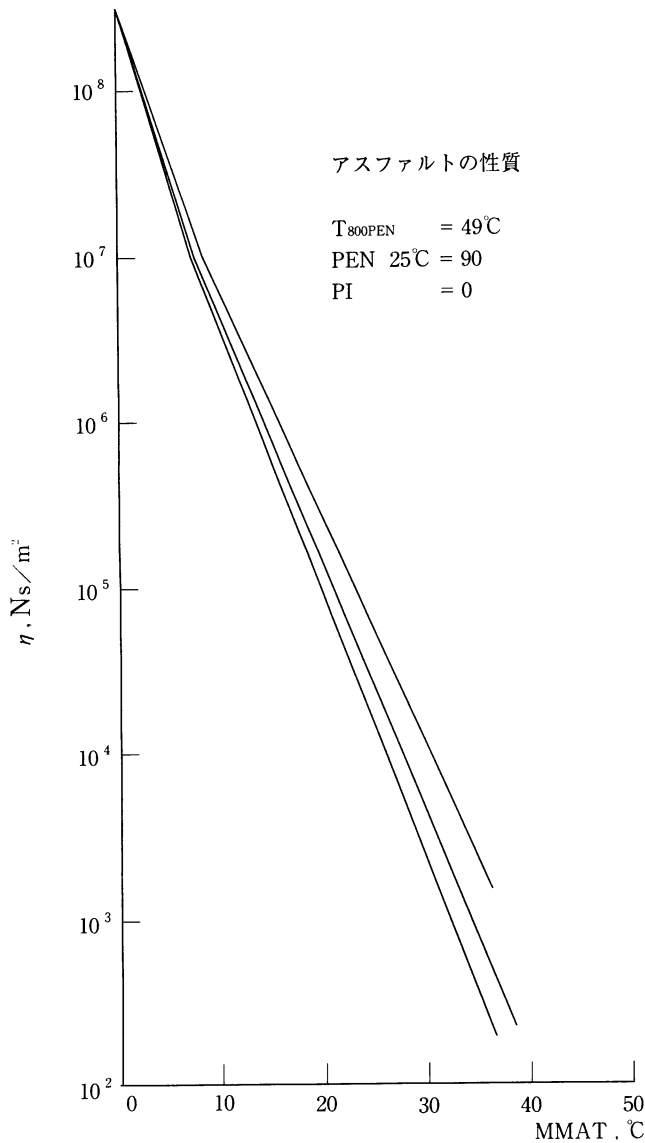


図3-13 MMATと日平均粘度の関係

必要がある。結局、式(27)が次のように書き替えることができる。

$$(Sbit) v = \frac{3 \eta y}{B \times W_y \times 0.02} \text{ N/m}^2 \quad \dots\dots(32)$$

Bは設計年数である。この式により、交通荷重、温度、アスファルトの性質が取り入れられたことになる。

(4) 分割された層の平均応力

アスファルト層の平均応力 σ_{av} は、非常に多くの変数、すなわち荷重の大きさ、接地圧、層の厚さ、剛性などによって影響を受けるが、シェルでは接地半径105mm、ポアソン比0.35、

載荷時間0.02秒に統一し、弾性計算を行なって各種の数表を作成している。

式(28)の平均応力と接地圧の比は次式で定義される。

$$Z_i = \frac{\delta_i / h_i}{\sigma_0 / E_i} (= \frac{\sigma_{av, i}}{\sigma_0}) \quad \dots\dots(33)$$

ここに Z_i : 分割した i 番目の層の平均応力と接地圧の比

h_i : i 番目の層の厚さ (mm)

E_i : i 番目の層の弾性係数 (N/m²)

σ_i : i 番目の層の変形量 (mm)

k 個の異なった粘度に対しては次式が用いられる。

$$Z_{av} = \left(\frac{\sum_{i=1}^k Z_i^{1/S} \frac{1}{\eta_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\eta_i}} \right) \quad \dots\dots(34)$$

ここに Z_{av} : 平均のZ係数

Z_i : ある時刻のZ係数

η_i : Z_i に対応する時刻の粘度, (Ns/m²)

S : $\log S_{mix} - \log S_{bit}$ の勾配

数多くの例について計算した結果からみると、一日のうち最も暑い時刻のZ係数を代表値にとれば近似度はかなりよいそうである。これは、最も暑い時刻の粘度がわだち掘れに大きく寄与することを意味しているものと思われる。

以上に述べた(1)~(4)の内容を図3-14のフローにしたがって計算すれば層厚減少 Δh が求められる。

なお、実際の路面でわだち掘れとして測定される値は、側面の盛り上がりがあるため Δh の1.5倍程度になるとのことである。

(5) シェルの予測法のまとめ

予測法の内容は、省略した部分も多いため理解し難い点もあったかと思うが、交通荷重、

粘度，層内の応力など，影響因子を数式化するプロセスとの考え方は，種々の点で興味深いものがある。以上の計算をする上で必要な実験データあるいは理論式の主なものをまとめると次のようになる。

- ① 一般の輪荷重を標準輪荷重に換算する方法
- ② アスファルトの粘度－温度関係と平均粘度の求め方
- ③ アスファルト混合物のクリープ特性
- ④ 層内の応力の計算法

そしてこれらを結びつけて層厚減少値を求めるに至った最初の出発点が，わだち掘れを

支配するのはアスファルトのステイフネスの粘性流動成分にあるとする考え方であったことを忘れてはならないだろう。

3-3-2 舗装構造の検討

わが国のわだち掘れ対策は，これまで材料面からの対応が主流となってきており，舗装構造の検討はほとんどなされていない。

わが国の構造設計法は昭和42年頃にほぼ確立され，以後，根本的な変更のないまま現在に至っている。この設計法においては， T_A と H を満足するように規定されているが，表層，路盤の厚さや路盤の工種はかなり自由に選択できるようになっている。したがって同一の T_A であって

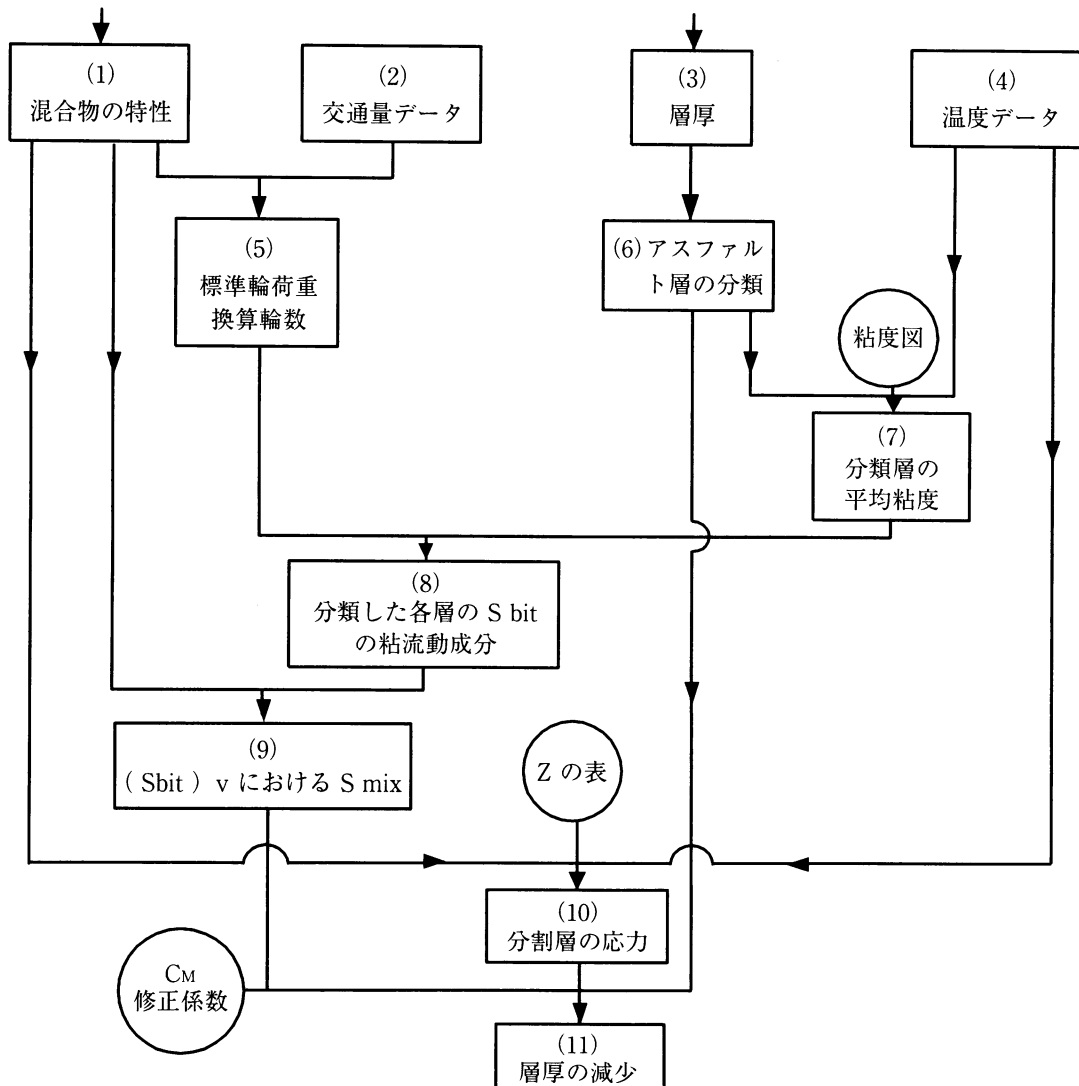


図 3-14 わだち深さを求めるフローチャート

も、各層の厚さや工種によって耐流動に差の生ずることは、シェルでアスファルト層内の応力を詳しく解析していたことから、当然考えられるはずである。

本節では簡単な断面を想定してアスファルト層内に生ずる応力を計算し、その分布形状から耐流動性を検討する。

いま、CBR = 3 の路床上に、アスファルト層 20cm を表層とし、粒状材、アスファルト、コンクリートをそれぞれ路盤 (20cm) とする 3 種類の断面を想定する。

以上の各層のヤング率は図 3-15 のように、ポアソン比は 0.35 と仮定して、5 t 輪荷重 (半径 17cm) を作用させたときの応力を、舗装表面から 2 cm ごとの位置につき多層弾性論のプログラム SHEVRON 5 L で計算した。

計算結果を図 3-16 に示すが、アスファルト層内の応力は路盤の種類によって大きく変わっていることが明らかである。アスファルト層内の応力が大きければ、圧縮量も大きくなるはずであり、図からは路盤の剛性が高いほど流動が生じやすいという結論が得られる。また、 T_A からみれば $A < B < C$ の順に大きくなっているから、 T_A が大きいほど (重交通になるほど) 流動が生じやすいという見方もできよう。

路盤の剛性が低いほどアスファルト層に作用する応力が小さいというのは、若干奇異な感じを受けるが、各点の変位量をプロットした図 3-17 を見れば納得できよう。変位量は応力と逆に $A > B > C$ となっており、A 断面では応力が小さくとも大きく変形することにより、交通荷重のエネルギーを受けとめていると解釈できるからである。

以上は、架空のモデルを使用した極めてラフな考察であるが、舗装構造によって耐流動効果が異なることはうかがえよう。ただし、剛性の低い路盤、路床に片寄りすぎると今度は、路盤や路床の圧密によりわだち掘れが生じる可能性があり、ここでもバランスのとれた設計が必要とされる。

3-3-3 高粘度アスファルトの研究

アスファルト混合物の材料面からわだち掘れに対処しようとする試みは、3-2 でも述べたとおり多くの研究者によってなされてきた。これらは、一般に骨材粒度、アスファルト量など主として配合設計に工夫をこらしてきたものであった。一方、前項でも考察したように、アスファルトの粘度がわだち掘れの極めて大きな要因になっている。このため、針入度 80/100 の軟らかいアスファルトから 60/80 へ、さらには

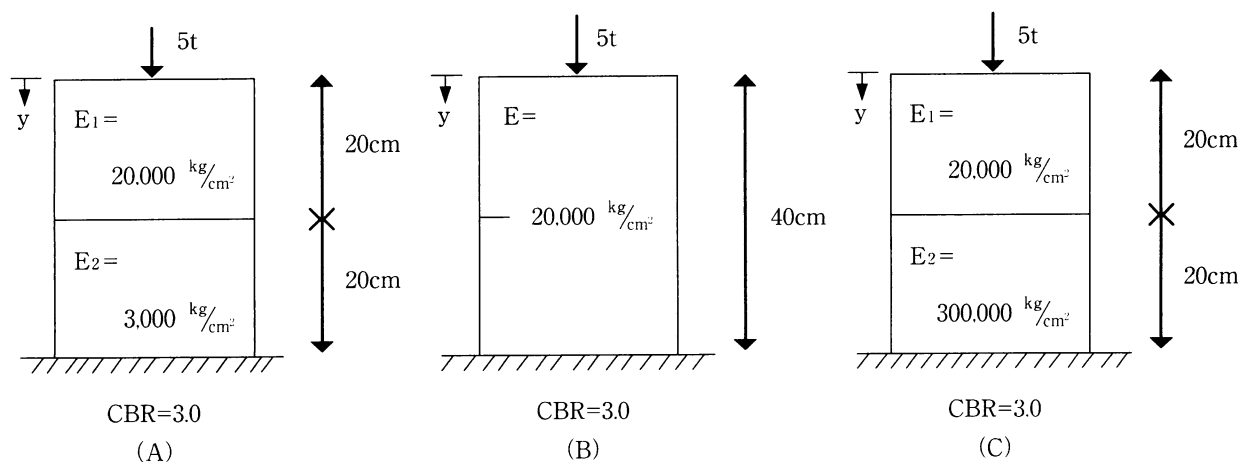


図 3-15 舗装断面図

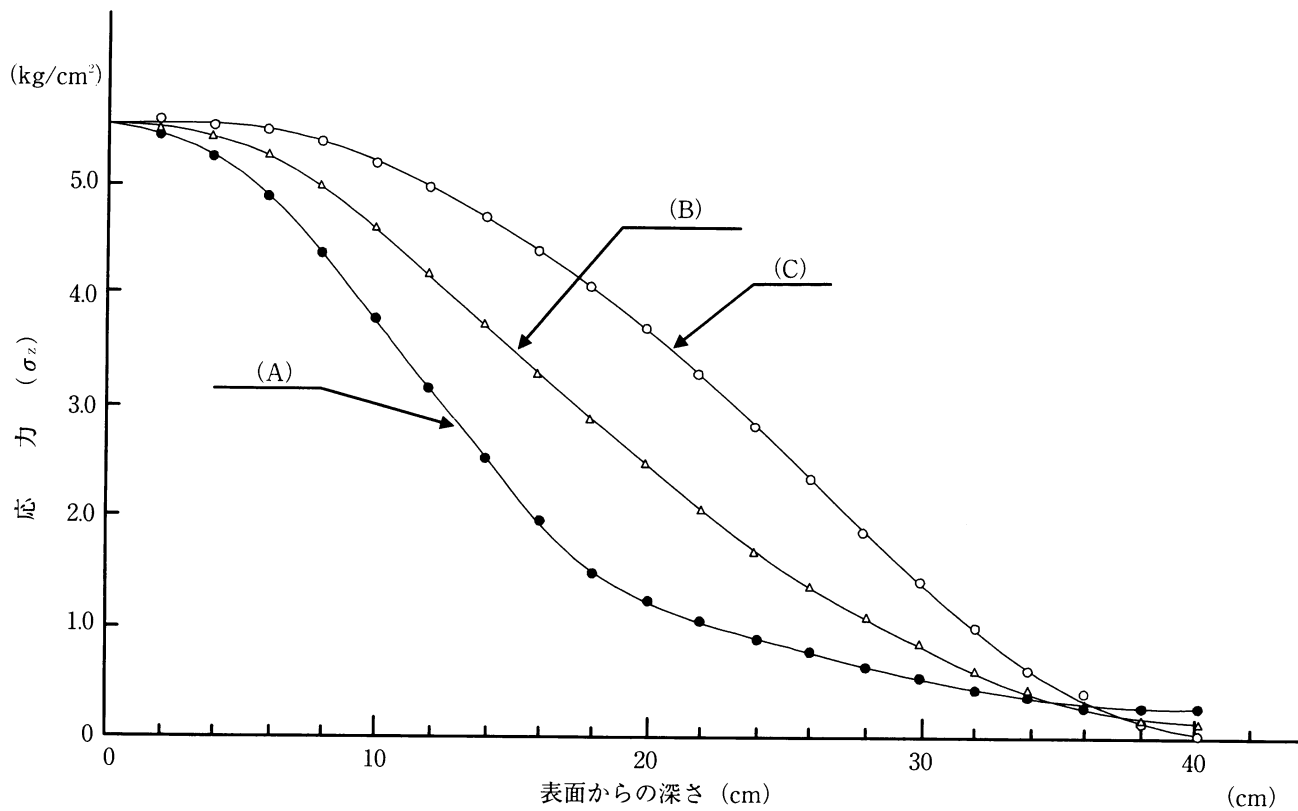


図3-16 応力の計算結果

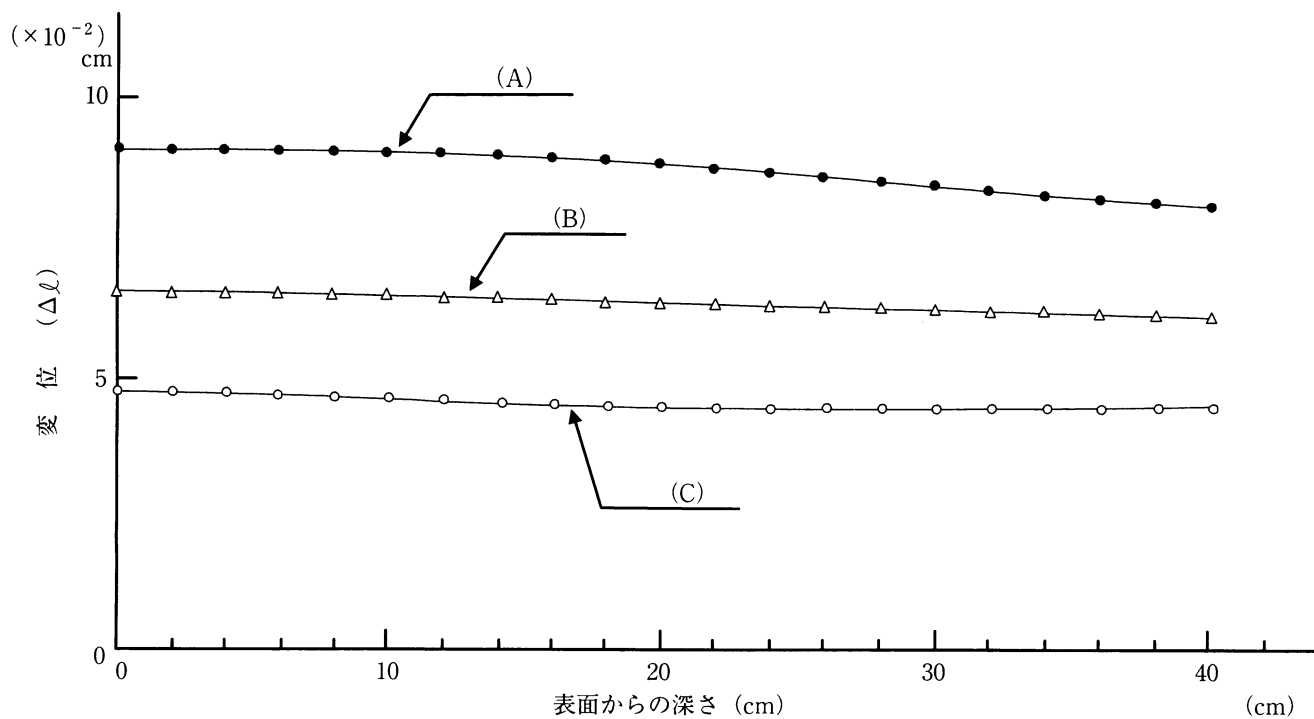


図3-17 変位の計算結果

40/60と硬いアスファルトへの移行がここ10年来みられてきたが、必ずしも十分な成果は得られていないようである¹¹⁾。

本項で紹介するのは、多田³⁾を中心とした舗装用高粘度アスファルトの一連の研究^{3), 12), 13)}である。この研究は、従来のようにアスファルトの硬さを針入度や軟化点で評価せずに、60℃における粘度を指標としてこれを高めたアスファルト（以下、高粘度アスファルトと称する）を開発し、試験施工を行なってその耐流動性を検討しているものである。

(1) 60℃粘度の導入

研究を進めるにあたって60℃粘度を導入した理由は次のように述べられている。

- ① わが国の路面最高温度が60℃とされていることから、流動現象を検討するには、このような高温時のアスファルトの性質をとらえる必要がある。
- ② アスファルト混合物の高温安定性を評価する方法であるマーシャル安定度試験、ホイールトラッキング試験は、いずれも60℃で行なわれており、この温度におけるデータが豊富である。

高粘度アスファルトを開発するに先だって行なわれた市販アスファルトの60℃粘度調査結果は次のとおりである。

針入度80/100 ……1,000~1,500 poise
針入度60/80 ……1,500~3,000 poise
針入度40/60 ……3,000~4,000 poise

(2) 高粘度アスファルトの開発

アスファルトの60℃粘度を高める方法は、種々検討の結果、後の実用化を考慮して一般性のあるブローイング方式が採用された。

そして、4,000poise（2種類）、8,000poise（3種類）、16,000poise（2種類）をそれぞれ目標とした計7種類の高粘度アスファルトを試作し、アスファルトの性状試験、これらを用いた混合物の力学試験を行なっている。その結果は、マーシャル安定度、ホイールトラッキ

ング試験の動的安定度と60℃粘度の相関がかなり高くなっており、60℃粘度を指標にした妥当性がうかがわれる。

(3) 規格の設定と試験舗装

試験舗装に供する高粘度アスファルトの品質は表3-8のように定められた。なお、第2次規格は第1次試験舗装の、第3次規格は第2次試験舗装の結果をもとにそれぞれ改訂されたものである。試験舗装は第1次~第3次と三次にわたって行なわれ、述べ12万㎡にも及んでいる。1つのテーマでこのように大規模な試験舗装が行なわれたのは、わが国では初めての試みである。

第1次試験舗装では、まず、規格以外に粘度の高いアスファルトが多かったこと、特に粘度比（TFOT後の粘度/原アスファルトの粘度）が6.0以上では早期にひびわれが発生したことなどから、規格に粘度比6.0以下という項目を設ける必要のあることが明らかとなった。

第2次試験舗装では、粘度比が6.0以下の規格内にあっても、5.0以上の場合にはひびわれの発生が見られたこと、60℃粘度が15,000poiseを超える場合にひびわれが発生したことなどから、規格の60℃粘度と粘度比をさらに下げた方が望ましいと判明した。

これを受けて、第3次試験舗装では品質規格のうち、60℃粘度を10,000±2,000poise、粘度比を5.0以下に設定した。この結果は現在調査中の段階にある。

表 3 - 8 高粘度アスファルトの品質規格

種 類 項 目	第 1 次 試 験		第 2 次試験	第 3 次試験
	AC - 140	AC - 80	AC - 140	AC - 100
粘 度 (60℃ poise)	14,000 ± 4,000	8,000 ± 2,000	14,000 ± 1,000	10,000 ± 2,000
粘 度 比 (TFOT後 / 原アスファルト) の粘度 / の粘度	—		6.0以下	5.0以下
動 粘 度 (180℃ cSt)	200以下		200以下	200以下
薄膜加熱重量変化 (%)	0.6以下		0.6以下	0.6以下
針 入 度 (25℃, 100 g, 5 秒)	40以上		40以上	40以上
三塩化エタン可溶分 (%)	99.0以上		99.0以上	99.0以上
引 火 点 (℃)	260以上		260以上	260以上
比 重 (25℃ / 25℃)	1,000以上		1,000以上	1,000以上

(4) 試験舗装の成果

一連の研究で最も重要なのは、高粘度アスファルトを用いて耐流動効果があったか否かということであろう。図 3 - 18は、大型車交通量に対するわだち掘れ量の変化を示したものであるが、第29回建設省技術研究会の調査結果に比べ、N = 100万台、300万台時点のいずれにおいてもほぼ $\frac{1}{2}$ 程度になっており、高粘度アスファルトの耐流動効果は明らかである。

図 3 - 19は、高粘度アスファルトの60℃粘度と、わだち掘れ量、ひびわれ率の関係を示したものである。わだち掘れ量は粘度が高くなるにしたがって減少していくが、逆にひびわれ率は粘度が高くなるに伴って増加していく。しかし、ひびわれは、粘度が10,000poise以下ではほとんど発生していないため、ひびわれを押えてなおかつわだち掘れを最小にする粘度はほぼ10,000poise程度と結論できる。すなわち、粘度の適正値が見い出されたわけである。

図 3 - 20は、コア回収アスファルトの粘度とわだち掘れ量、ひびわれ率の関係であるが、

同様にして粘度の適正值50,000poiseが得られる。これは、粘度比5.0以下の品質規格に合致している。

図 3 - 21は、さらに動的安定度とわだち掘れ量、ひびわれ率の関係を示したものであるが、この図からは動的安定度の適正值ほぼ4,000回/mm程度という値がうかがえる。

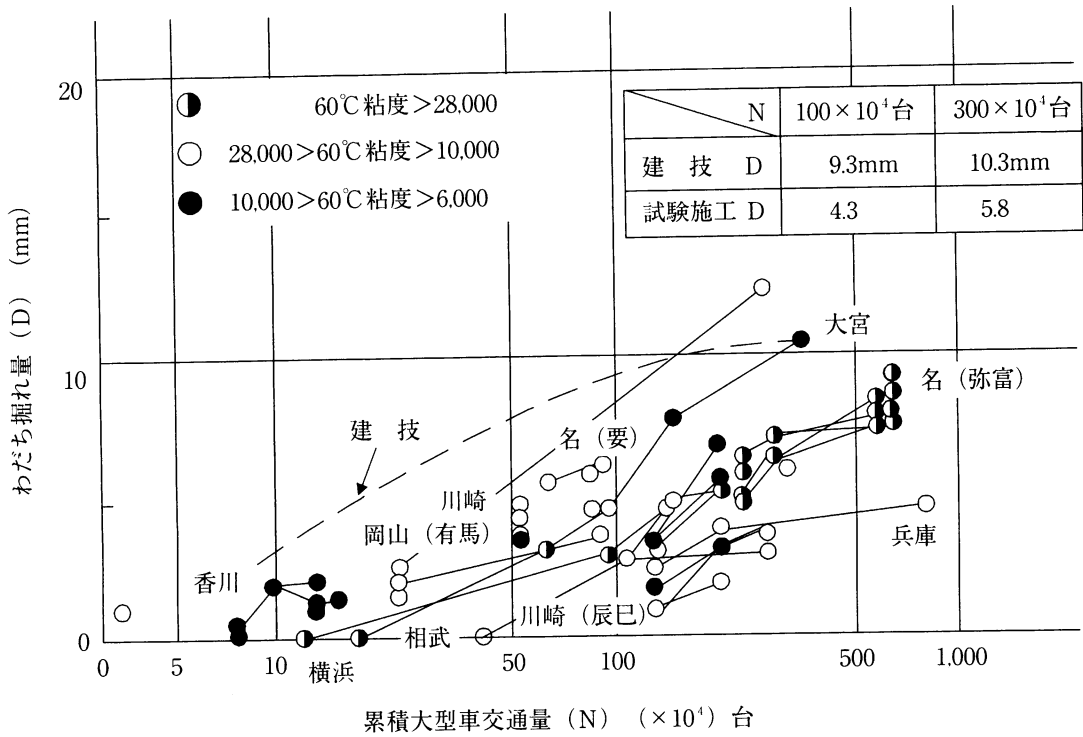


図 3 - 18 Nとわだち掘れ量 (D) の関係 (単路部)

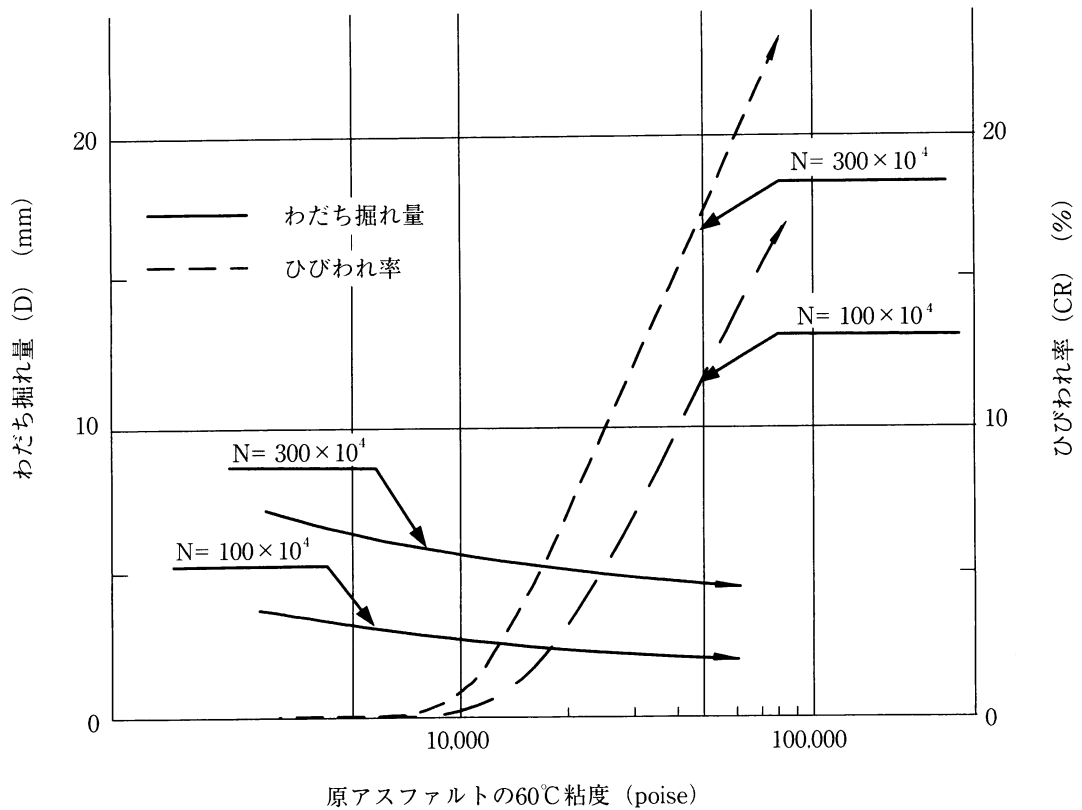


図 3 - 19 原アスファルトの60°C粘度と供用性の関係

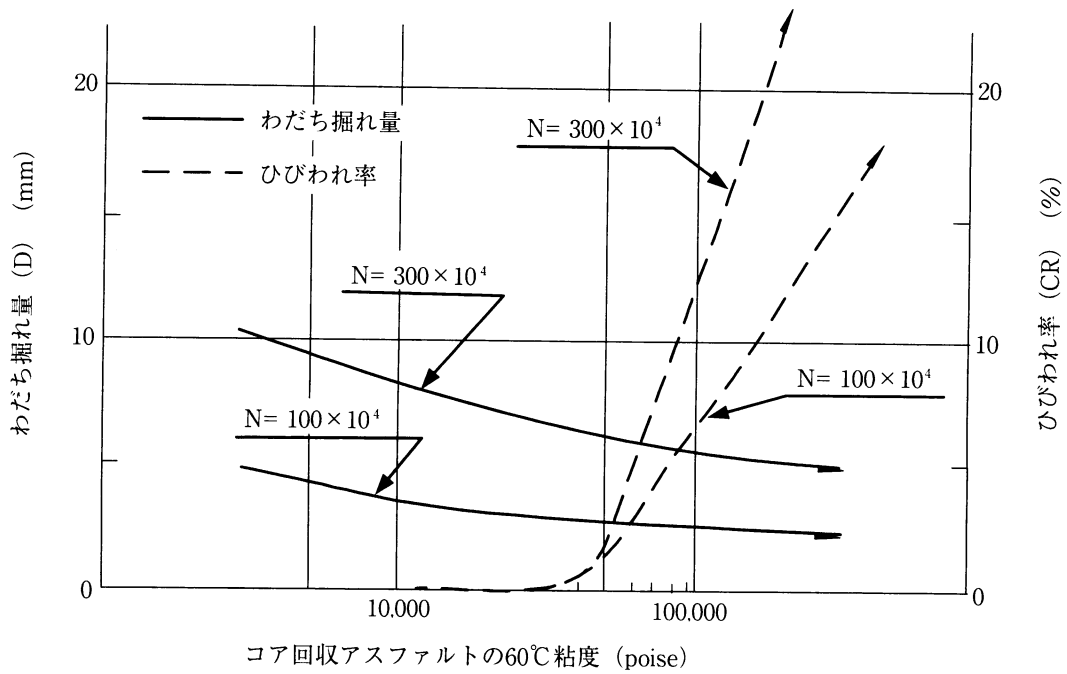


図 3 - 20 コア回収アスファルトの60°C粘度と供用性の関係

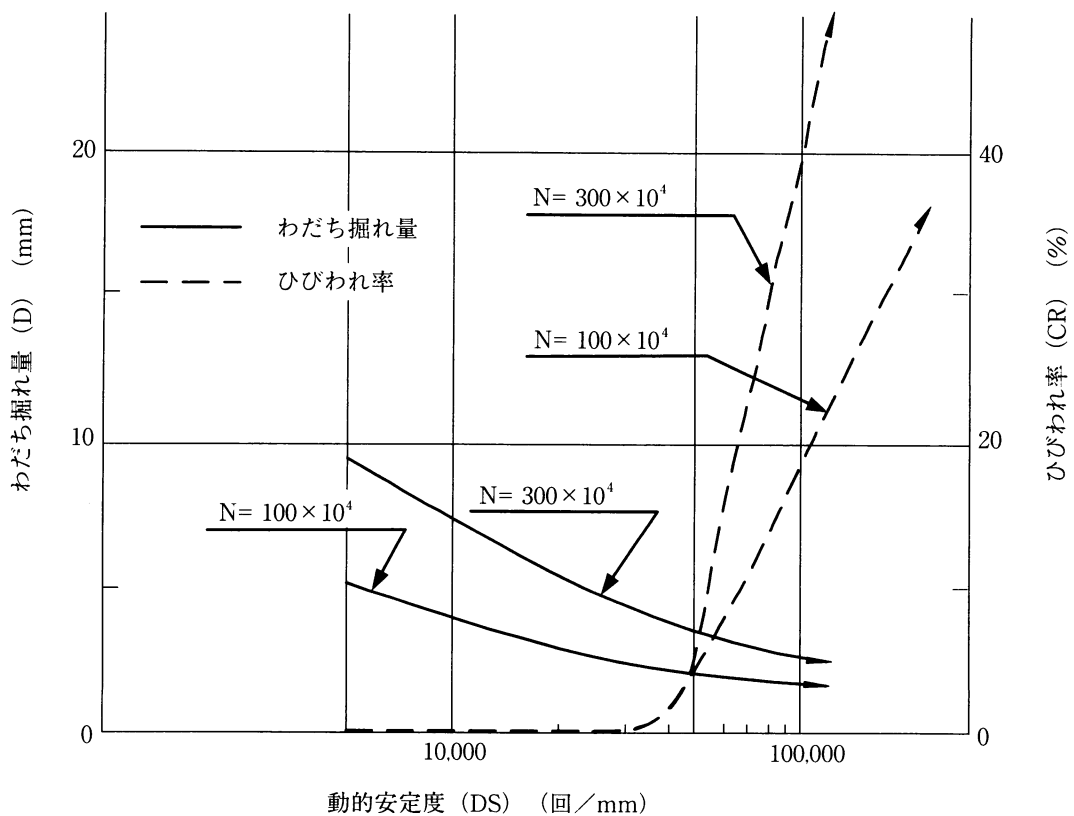


図 3 - 21 動的安定度 (DS) と供用性の関係

参 考 文 献

- 3) 多田宏行「アスファルトの粘度調整による舗装の流動防止に関する研究」
東京大学 昭和57年
 - 4) “Bituminous Materials in Road Construction”
Road Research Laboratory, 1962
 - 5) 「アスファルト混合物の配合設計・材料に関する幕張試験舗装および室内実験による検討」
土木研究所資料923号
 - 6) 「アスファルト舗装路面性状の実態調査に関する解析結果報告書」
高速道路調査会, 昭和53年
 - 7) 阿部頼政他, 「アスファルト舗装の供用性評価式に関する一考察」
土木学会年次学術講演会, 昭和57年
 - 8) A. I. M. Claessen 他 “Asphalt Pavement Design – The Shell Method”
The Fourth International Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavement, 1977
 - 9) 阿部頼政「アスファルト舗装の構造設計における最近の動向(3)」アスファルト, No.116
 - 10) J.M. Edwards 他 “Structural Design of Asphalt Pavements for Road Vehicles”
Highways and Road Construction, 1974
 - 11) 小野豊他「わだち掘れ対策としての針入度40–60アスファルトの効果」
舗装, 昭和52年8月
 - 12) 「重交通道路の舗装用アスファルトの研究」
日本アスファルト協会, 昭和53年
 - 13) 多田宏行他「セミブローンアスファルトを用いた試験舗装」
道路, 昭和55年6月
- その他) 阿部頼政他「歴青系材料」土木学会, 昭和55年