

アスファルト混合物の低温領域における 破壊時のレオロジー挙動

RHEOLOGICAL FRACTURE BEHAVIOR OF BITUMINOUS MIXTURES AT LOW TEMPERATURE

菅原 照雄*・上島 壮**・森吉 昭博***
By Teruo SUGAWARA, Tsuyoshi KAMIJIMA and Akihiro MORIYOSHI

1. 概 説

本論文は複雑な力学的性状を示すアスファルト混合物の主として低温（おおむね $-20^{\circ}\sim+30^{\circ}\text{C}$ ）における破壊にみられるいくつかの規則的に変化する力学的挙動に関する実験研究の成果をとりまとめ、アスファルト混合物（以下単に混合物という）の破壊時のレオロジー挙動に考察を加えたものである。

著者らが先に明らかにしたように^{1)~3)}、混合物の破壊のモードはおおよそ次の3つに大別され、それぞれの破壊強さ、破壊時のひずみ、破壊時スティフネスは著しい差異を見せる。すなわち、

- きわめて小さな破壊ひずみしか示さない、ぜい性破壊領域での破壊
- 強さが極大値をみせ、応力・ひずみ曲線で降伏現象らしきものがみられる転移領域での破壊
- 流動を伴い、比較的大きな破壊ひずみを示す、流動を伴う破壊領域での破壊

がそれである。

それぞれの領域で、破壊強さ (σ_b)、破壊時のひずみ (ϵ_b) ならびに破壊時スティフネス ($S_b = \sigma_b / \epsilon_b$) の各数値は異なり、 σ_b -温度、 ϵ_b -温度ならびに S_b -温度関係はそれぞれ、山型を示す曲線、ゆるいS字曲線、片下りの曲線として示される。この3つの曲線は諸種の変因に依存して、温度軸に沿って平行に移動する。すなわち破壊のモードは、与える条件へのレスポンスとして変化するもののように思われる。したがって、これらの因子についての考察はレオロジー論的にきわめて興味深いものである。実用上の見地から、そのもつ意味は十分明

らかではないが、注目すべき特性であると思われる。

混合物の特性から、これらの性状に影響を与えられると思われる因子は数多くあげられるが、それらが複雑な重なりを見せることなどから、

現在の研究のレベルにおいてそれらをすべて網羅することは困難である。本研究ではそれらのうち、特に重要と思われるものについて、それらの条件をできるだけ広範囲に変化させて、そのレオロジー性状を把握すべく、図-1 に示すような一般概念に基づいて考察を進めた。したがって、ここでは実用上無関係と思われる範囲まで、アスファルトの種類、ひずみ速度、温度などを広く変化させた。

なお総合的に論を進めるため、一部既発表論文と重複を避けられなかった部分もあるがあらかじめお許しいただくことにする。

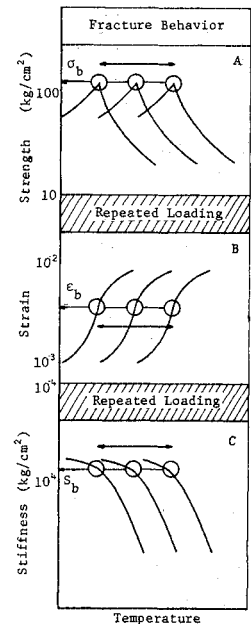


図-1 破壊の一般概念

2. 実験、解析の方法ならびに試料

本研究では、ひずみ速度を制御して曲げ試験を行ったが、実験方法ならびに解析の方法はさきの報告^{1),2)}と全く同一なのでここでは省略する。

使用したアスファルトは、ストレートアスファルトにはじまり、触媒を用いたブローンアスファルト、ゴムなどを添加したアスファルトなど多種にわたり、針入度、

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木教室

** 正会員 北海道大学助手 工学部土木教室

*** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木教室

感温性などのかかなり大幅に異なるもの、原油ならびに製法の異なるものなど、その数約 50 種におよぶ。また混合物としては、アスファルト量が重量比 25% のマッシュアスファルトから一般にアスファルトコンクリートの名でよばれるものまでこれも多種にわたるが、多くの場合これを骨材体積率 C_v としてデータの処理を進めた。ここで C_v が 0.70 以下のものは締固めを必要としない無空隙混合物（若干の連行空気を含むことは避けられないが通常 2% 以下）であり、それをこえるものは転圧を必要とする通常用いられる加熱混合物である。0.70 をこえるものについては空隙率を 4% 前後として、マーシャル法で配合設計を行ったものであるが、本実験では、ローラ・コムパクトで転圧した後に、さらにトラッキングによるニーディング作用を与えているので、供試体の空隙率はほとんどのものについて 2~3% となっている。

実験に用いた材料、配合がこのように多岐にわたるのは、なるべく普遍的な性状を求める目的と、後述する実測値のばらつき、精度上の問題から、対象によってはばらつきが小さくなるような配合を特に選んだこと、研究期間が約 10 年にわたり、その間、アスファルト、骨材などの同一試料が入手できなかったことなどの理由による。したがって本論文中に、アスファルトの性状、配合などのすべてを示すことは不可能であり、代表的なものだけに止めた。なお配合の代表的なものは付表として本論文の末尾に示した。

3. 破壊時の強さ、ひずみ、スティフネス— 温度関係の対応

(1) 破壊時の性状と温度との関係^{1),2)}

先にも若干触れたように、 σ_b -温度、 ϵ_b -温度、 S_b -温度の 3 つの曲線は与える条件の変化により、図-1 に示すようにその形状を変えることなく、温度軸に沿ってほぼ平行に移動する。3 つの曲線の移動量は完全に同一であり、この 3 つの曲線は完全な対応関係にあると思われる。この対応関係は、著者らが試みたあらゆるアスファルト、配合、ひずみ速度などで成立した。したがってこの対応の成立は、混合物の破壊にみられる規則性の最も代表的なものとしてでき、この対応関係の特徴を転移領域の温度軸上での動きに見出すことができる。

(2) 転移領域における破壊

a) ぜい化点 (Transition Point, T_B)

本研究では、応力・ひずみ曲線に降伏点がみられる領域、すなわち σ_b -温度曲線のピーク、 ϵ_b -温度曲線の

変曲点の近傍に転移領域の名を与えたが、これは実験の結果によれば 2°C 前後の幅として示されるらしく見える。したがってこれを点として特定することは困難であり、そのピークが著者らの示すように尖ったものなのか、あるいは丸みを帯びたものなのかは不明である。しかしその温度幅のせまさと、実験精度上から著者らは σ_b -温度曲線上で、流動を伴う領域の曲線と、ぜい性領域の曲線の交点をもって便宜上転移領域を代表させ、これを温度をもって示されるぜい化点 T_B として表現する方法をとった。

なおこの転移領域での破壊には、先に述べたいくつかの性質のほか、この点の近傍で実験値のばらつきの程度が大きく変化するなど、レオロジー論的に興味深い現象がいくつか見られる。本節ではこれらに関し考察を試みることにする。

b) ぜい化点における曲げ強さ

ぜい化点での曲げ強さに関し、2 つの角度から検討を試みた。すなわち、

(i) 同一混合物に関しひずみ速度のみを変化させた場合

(ii) 材料、配合およびひずみ速度を変化させた場合において σ_b がいかに変化するかについて実験を試みた。

(i) に関してはすでに曲げ強さに関する発表で明らかにしたように、混合物の材料、配合が一定のとき、ピークでの σ_b はほとんど変化せず一定値が得られた。他のいくつかの混合物に関しても全く同様の結果が得られ、同一混合物でひずみ速度を変化させ、異なる T_B を得ても、 T_B での強さには変化はない¹⁾と結論できそうである。しかし、混合物の配合、使用アスファルト、空隙率などを変化させたとき σ_b の絶対値にはかなりのばらつきが見られる。

(ii) においては、 σ_b の絶対値の差が何によってもたらされるかについて検討を試みた。約 30 種のものについて、使用アスファルト、配合、ひずみ速度などを広範囲に変化させ、その結果を C_v との関係として示したのが図-2 である。図-2-a は、横軸に C_v をとり、縦軸に T_B での σ_b を示したものである。この実験データには T_B が 0°C 前後から 15°C 前後のものまでが含まれている。

図によれば、 σ_b はかなりのばらつきを見せながら、 $C_v=0.60$ 付近で極大値を示している。 $C_v=0$ すなわちアスファルトでの 50 kg/cm^2 が、0.60 では 150 kg/cm^2 と上昇し、さらに C_v が増大することにより、強さは急激な低下をみせる。普通舗装用アスファルト混合物はこの急激な低下をみせる領域にある。これは骨材の添加が空隙の存在をもたらし、膜厚の低下とともに強さは低下

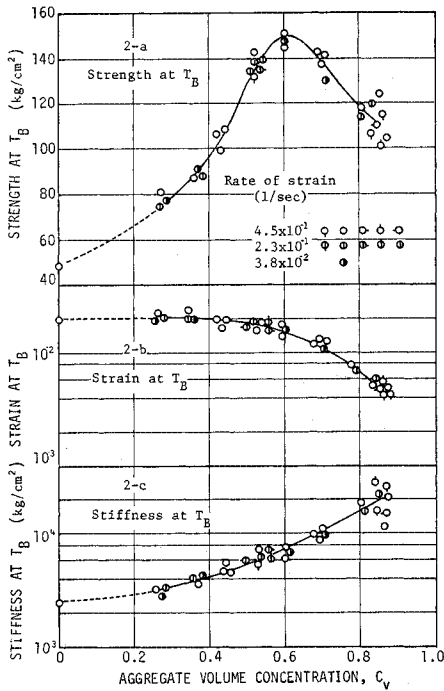


図-2 ぜい化点における曲げ強さ、破壊時のひずみ、破壊時スティフネスと骨材体積率、 C_v 、との関係

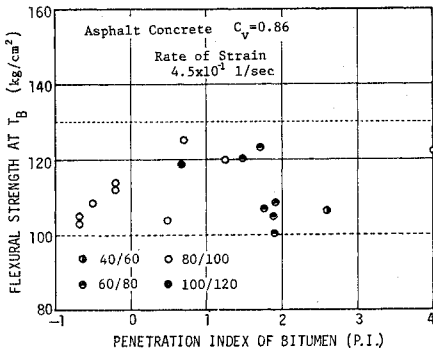


図-3 ぜい化点における曲げ強さ (P.I. の異なるアスファルトの場合)

し、さらにきれつの伝播速度がはやめられることなどによるものと考えられる。通常用いられるアスファルトコンクリートでは σ_b は $100 \sim 140 \text{ kg/cm}^2$ になっている。

図-3 は、これらをさらに詳細に求めるため、ひずみ速度を $4.5 \times 10^{-1} \text{ 1/sec}$ と一定にとり、40/60 級から 100/120 級まで針入度が異なる 17 種のアスファルトを用い、 $C_v=0.86$ の混合物に関して実験を行った結果をとりまとめたものであるが、整理の都合上アスファルトの針入度指数 (P.I.) を横軸にとってのいる。これによれば、 T_B での σ_b はアスファルトの性状にほぼ無関係に $100 \sim 130 \text{ kg/cm}^2$ の幅のなかに入っている。

以上の結果から、ぜい化点での曲げ強さは、その温度に無関係に、ほぼ骨材体積率によって支配され、骨材体積率が一定ならばある幅のなかに入るものと思われる。本実験ではアスファルトコンクリートの名で呼ばれる $C_v=0.86$ 程度の混合物に関しては $115 \pm 15 \text{ kg/cm}^2$ の曲げ強さが得られた。

なおこの曲げ強さは先に触れたように空隙率が $2 \sim 3\%$ のものについての数値であり、空隙率の大きなものでは若干低下するものと思われる。

c) ぜい化点での破壊時のひずみ

図-2-b は T_B での ϵ_b を b) と同様に求めた結果を示したものである。ここでも T_B での ϵ_b は C_v に大きく支配されており、アスファルト単体での 2×10^{-2} から $C_v=0.86$ 程度で 5×10^{-3} まで変化しており、特に $C_v=0.60$ 以上での変化が大である。先の図-3 での方法と同じように 0.86 での数値を求めてみると、 T_B での ϵ_b は $(5 \pm 1) \times 10^{-3}$ になっているものと思われる。

0.86 程度の C_v の混合物の破壊時ひずみがクリープ破壊での 6×10^{-2} からぜい性破壊での 1×10^{-3} とかなり大きく変化する²⁾ ことから考えれば、 T_B での ϵ_b が $(5 \pm 1) \times 10^{-3}$ とせまい幅に特定できるのは興味ある結果である。

d) 破壊時のスティフネス

先に述べた σ_b と ϵ_b の関係からスティフネスに示される特性は容易に予測できるが、 σ_b/ϵ_b として破壊時スティフネスを算出してみた結果が図-2-c である。骨材の添加は当然スティフネスの増大をもたらし、 $C_v=0.86$ では、アスファルト単体の約 10 倍の値、すなわち $(2 \pm 1) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ の幅におさまっているように思われる。

e) 特性値としてのぜい化点

a)~d) に述べたように、ぜい化点での $\sigma_b, \epsilon_b, S_b$ は、 C_v に大きく依存して変化するのみで、アスファルトの性状などにはあまり支配されず、同一 C_v でほぼ近似した数値を示す。すなわち T_B が高温にあるにしろ低温にあるにしろ、それと無関係に T_B での $\sigma_b, \epsilon_b, S_b$ はある C_v においてほぼ等しいとすることができよう。このなかで特に注目すべきものは S_b であり、混合物の S_b が、与える条件次第で 10^5 kg/cm^2 から 10^2 kg/cm^2 あるいはそれ以下まで 4 つ以上のオーダーにわたって変化する (ごく短い時間での動的応答からクリープ時の応答まで) にもかかわらず、 T_B での S_b が $C_v=0.86$ で $(2 \pm 1) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ とせまい幅で表現できる意義は大きいとしなければなるまい。これは、アスファルトにおいて Van der Poel⁹⁾ がフラースぜい化点でのスティフネスが等しいとした結果とよい対応を示している。

したがって、ここでは、ぜい化点を混合物のレオロジー特性をよく表現する特性値の 1 つとみなして論を進

め、ぜい化点の動きをとらえて破壊性状を論ずることにする。

(3) 曲げ試験における試験値のばらつき

単にアスファルト混合物に止まらず、多くの材料において、試験値のばらつきが破壊のモードによって変化することはすでに広く知られており、ばらつき特性がレオロジー論において重要な意味をもっている。

著者らの実験の結果によれば、このばらつきの程度は混合物の型と破壊のモードに依存しているように見受けられる。そこでこれらに関し、マッシュアスファルト、サンドアスファルト（アスファルトモルタル）、密粒度アスファルトコンクリートの3つの型の混合物を選び、各温度において20個ずつの供試体を用いて、そのばらつき特性を検討した。それから明らかにされた結果はおおよそ次のようなものであり、レオロジー材料にみられるものとはほぼ同様な性状を示すことが明らかにされた。

i) 破壊のモードによって測定値のばらつきの程度はかなり大きく変化する。

ii) ぜい性領域での曲げ強さ、破壊時のひずみの変動係数は、混合物の型にはほぼ無関係に、それぞれ約7%、18%となる。

iii) 流動領域での変動係数は混合物の型によって変化し、表-1に示すように粗骨材を多く含むものは大となる。

表-1 流動破壊領域における変動係数 (%)

	マッシュアスファルト	サンドアスファルト	アスファルトコンクリート
曲げ強さ	1.5	2.0	3.8
破壊時のひずみ	6.0	10.2	11.8

iv) ぜい性領域での変動係数は、流動領域でのそれを大きく上回る。

以上から測定値の変動は、試験法に依存するもののほか、混合物の型によるものなどがあり、さらに大きな要素として、破壊のモードによるものが加わったものに基づいており、きわめて複雑なものであることをうかがわせる。

4. 温度、ひずみ速度依存性

ここでは -20~30°C において、ひずみ速度を変化させた場合の T_B の移動、 σ_b , ϵ_b , S_b の変化などを検討した結果について述べることにする。実験としては、各種の混合物について、ひずみ速度が変化した場合 T_B がいかに変化するかを求め、さらに代表的なアスファルト混合物に関し、時間・温度の重ね合せ、すなわち時間・

温度換算則の破壊性状への適用の可否を検討した。

(1) ひずみ速度依存性

アスファルト単体ならびに3種の混合物を選び、ひずみ速度を約4オーダー変化させて、それぞれの T_B を求めた結果を示したのが図-4である。図-4は、横軸に T_B を絶対温度にとってその逆数を目盛り（参考のため普通温度目盛をも示してある）、縦軸にひずみ速度の対数を目盛ったものである。

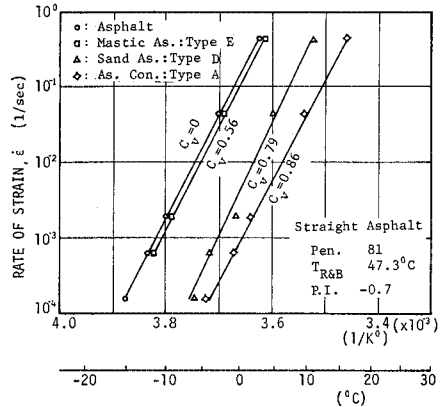


図-4 種々のひずみ速度におけるぜい化点

これらの実験の結果、おおよそ次に述べるようなことが明らかにされた。

i) アスファルトおよびアスファルト混合物において絶対温度でとった T_B の逆数とひずみ速度の対数との間には直線的関係が存在し、

$$\log \dot{\epsilon} = \frac{\alpha}{T} + \beta$$

ここで、

$\dot{\epsilon}$: ひずみ速度 (1/sec)

T : 絶対温度で示した T_B (°K)

α, β : アスファルトのレオロジー性状、混合物の配合などによって定まる定数

として表現される。

ii) 使用アスファルトのレオロジー性状が一定ならばこの曲線の勾配はほぼ一定となる。

iii) 同一ひずみ速度においては C_b の大きなものほど T_B は高い温度を示す。

iv) ひずみ速度1けたの差は 5~6°C の T_B の移動をもたらす、すなわち大きなひずみ速度は高いぜい化点をもたらす。

以上の結果は、ひずみ速度が T_B の移動に顕著な影響を与えることを示し、したがって混合物のレオロジー性状はひずみ速度に大きく依存すると結論される。例を $C_b=0.86$ にとってみれば、 1.5×10^{-4} 1/sec のひずみ速

度では T_B は -5°C 付近にあるのに対し、 4.5×10^{-1} 1/sec では T_B は 15°C にあり、その差は 20°C にも及んでいる。このことは小さなひずみ速度では 0°C でも混合物は流動破壊するのにに対し、大きなひずみ速度では 15°C でもぜい性破壊を示すことを物語っている。またアスファルト単体と $C_b=0.86$ の混合物の間にはほぼ 10°C にもおよぶ差がみられる。

(2) 時間・温度換算則の破壊への適用

破壊以前の小さなひずみの範囲内において混合物のレオロジー挙動を論ずるとき、時間・温度換算則が適用できるといわれる。これに対し破壊は明らかに非線型領域にあり、時間・温度換算則がそれにまで適用出来るか否かについてはいまだ定説はないが、ここでは T.L. Smith の方法⁵⁾ に準じ、それを破壊に適用することを試みた。

図-5 はアスファルトコンクリートを用い、ひずみ速度、温度を変化させて、それぞれ σ_b , ϵ_b ならびに S_b を求め、それを整理して見た結果である。

図-5-a は σ_b に関し、横軸に $\dot{\epsilon}$ をとり、 $-20 \sim 30^\circ\text{C}$ の 10°C ごとにそれらのマスターカーブを示したものである。なお図では 0°C を基準温度にとったものみに測定値を記入しておいた。各マスターカーブのうち実線で示された部分が測定領域であり、点線で示された部分はシフトして得られたものである。

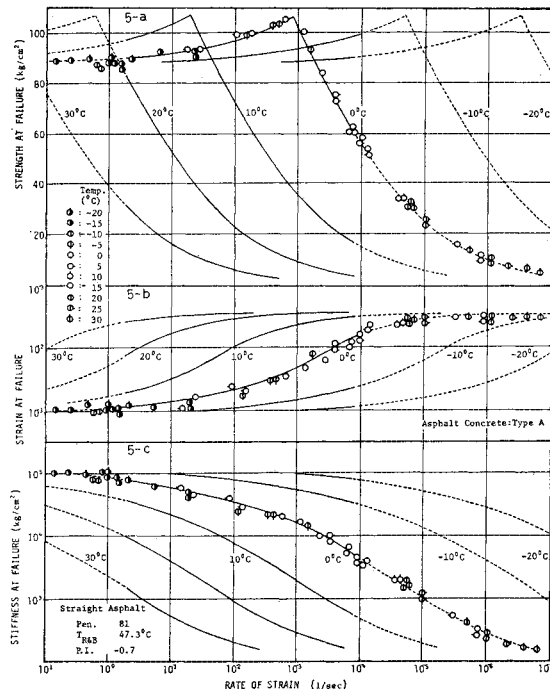


図-5 曲げ強さ、破壊時のひずみ、破壊時スティフネスとひずみ速度の関係を示すマスターカーブ

図-5-b, c は全く同様にして得られた ϵ_b , S_b のマスターカーブである。 S_b のカーブは、動的性状として 10^{-4} レベルのひずみを与えて得た曲線と類似の形状を示しており⁶⁾、また当初予測したものに比しきわめてなめらかな曲線として描かれている。この意味から、時間・温度換算則が破壊にまで適用できる可能性はきわめて高いと思われる。しかし混合物の破壊にみられるばらつき性状などからみて、これらのデータのみでその成立を断定することは困難であり、ここでは混合物が規則性をもった破壊性状を示すことの一つの論拠に止めるべきであろう。

ここに述べたマスターカーブからその全容を把握することは容易ではないことから、本研究では、 σ_b , ϵ_b , S_b と、温度、ひずみ速度に関し 3 軸座標上の面として表現することを試みた。

図-6-a, b, c はそれぞれ 図-5 から得られたものである。この3つともがかなり複雑な形状の面として示されている。 σ_b はとがった尾根をもつ山の形で示され、その尾根の線がぜい化点の移動を示している。すなわちこの尾根を境にして、モードの異なる破壊性状を示す。また ϵ_b に関しては、それがそれぞれ上限値、下限値を有することから、ぜい性破壊において十分温度の低い側での平面部から、流動破壊部分のゆるやかな勾配の面へと複雑な形状の斜面で結ばれている。この斜面に沿った点線でぜい化点の移動が示されている。 S_b については、上限値に近いと思われる平面部からひずみ速度が小で、温度の高い側に向かって傾斜しており、ぜい化点はその肩の部分移動している。

それぞれの曲面が存在している位置、形状は混合物の配合、使用するアスファルトによって異なることは前節までに述べたことから容易に推測されるが、基本的にはその性状はこの図に示したものと類似のものとなることはいうまでもない。これらの曲面の形状はアスファルト混合物の破壊に示されるレオロジー挙動を典型的に表現しているように見うけられる。

5. アスファルトの性状の影響

(1) 概 説

一般にアスファルト混合物の性状はそれに使用するアスファルトの性状に依存するといわれている。現象として最も明らかなものは感温性の変化であり、特に高温において顕著である。このように定性的にきわめて明瞭であるにもかかわらず、それらを系統づけて説明することが困難なのは、単にアスファルトの性状が異なるというてもいろいろな場合が存在し、単純な比較が著しく困難

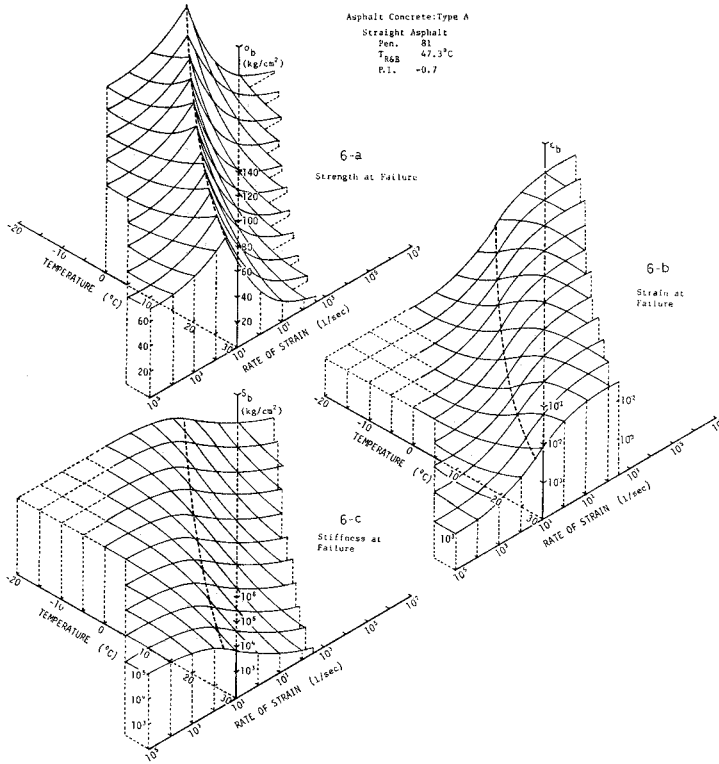


図-6 アスファルトコンクリートの曲げ強さ、破壊時のひずみ、破壊時スティフネスに及ぼすひずみ速度、温度の影響

なことに基づいている。すなわち性質が異なるという場合に考えられるのは、

- (i) 感温性（たとえば P.I.）が一定で、コンシステンシー（たとえば針入度級）が異なる場合
- (ii) ある温度でのコンシステンシーが同一で、感温性が異なる場合
- (iii) 感温性とコンシステンシーの双方が異なる場合の3つの場合であり、さらにその他、原油、製法等の差に起因するもの、アスファルトの劣化に伴うものなどが加わり、問題を複雑なものにしている。

(i) の場合には針入度との関係として整理が可能ではあるが、原油・製法の異なる各種アスファルトにまでその関係を適用することはできない。(ii) の場合には P.I.などをパラメーターにとることによってある程度解析が可能であるが、針入度の異なるものにまでその関係を適用することはできない。(iii) の場合は最も複雑ではあるが、通常われわれのよく経験する場合であり、この際の整理手法の確立がきわめて重要とされる。

アスファルト単体の性状比較に際して従来とられてきた方法は、ある基準となる温度を定め、試験温度を基準温度からの温度差として表現する方法である⁴⁾。この基準となる温度としては、“ある性質が一定となる温度”

が選ばれ、一般には等コンシステンシー温度、等粘度温度、等スティフネス温度などが用いられてきた。すなわちアスファルトにおける軟化点 (T_{R & B})、フラスゼい化点などがこの基準温度に相当する。このほか研究的な目的のために、せん断速度をも加味した等粘度温度（厳密には軟化点は等粘度温度とはいえない）、振動法などを用いた等スティフネス温度⁷⁾ などがあるが混合物の性状を論ずるにはそれらを用いるまでもないと思われる。

一方、混合物に関しては過去にほとんど報告の例はみられないが、当然アスファルトのそれらに対応する基準温度の設定が可能と思われる。等コンシステンシー温度、等粘度温度に相当するものとしては、実用上等変形抵抗温度、等安定度温度などが考えられようし、またフラスゼい化点に対応するものとして、先に述べた等スティフネス温度としての混合物のぜい化点の利用が考えられる。アスファルトのコンシステンシー、レオロジー性状が異なる場合でも、アスファルトの軟化点に

相当する温度でのマーシャル安定度はほぼ等しいという著者らの研究結果⁸⁾と、同様にしてホイールトラッキング試験での結果⁹⁾の2つから混合物の等変形抵抗温度、等安定度温度は、一定混合物に関し近似的に軟化点をもって代替できるとしても大きな誤りにはならないであろう。

以上の論に基づくとき、アスファルト混合物に関しても、温度を基準温度からの温度差として処理して、広く性状の異なるアスファルトを用いた混合物の性状を比較して論ずることが可能となろう。

(2) アスファルトの性状が異なる場合

a) フラスゼい化点と混合物のぜい化点との関係

フラスゼい化点はひずみ速度が一定になるように定められたアスファルトのぜい化点 (°C) であり、混合物のぜい化点との間に密接な関係が存在することが予測されるのは当然であるが、これらに関する研究は皆無といってもよいであろう。本研究ではほぼ同一針入度でかつフラスゼい化点の異なる5つのアスファルトを選び、マッシュアスファルトとしてそのぜい化点を求め、表-2に示すような結果を得た。この結果によれば、混合物の T_B とフラスゼい化点の間には 21~23

表-2 マスチックアスファルト* のぜい化点とフラス ぜい化点の関係 ($\dot{\epsilon}=2.3 \times 10^{-1} 1/sec$)

番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec)	93	91	91	92	88
軟化点 (°C)	43.0	44.7	45.4	45.3	47.3
P.I.	-1.7	-1.2	-1.0	-0.9	-0.5
フラスぜい化点 (°C)	-11	-12	-14	-15	-19
混合物のぜい化点 (°C)	+12	+9	+8	+8	+4
混合物のぜい化点とフラスぜい化点の差 (°C)	23	21	22	23	23

* Type E 混合物

** コーリング原油から得られた低アスファルテンアスファルト

°C とほぼ一定の温度差が存在している。試験に用いるひずみ速度が変化すればこの温度差は当然変化する。なおこの試験に用いた P.I. = -1.7 なるアスファルトは、フラスぜい化点が高いと同時に、混合物のぜい化点もきわめて高いが、これは最近ではほとんど製造されていないコーリング原油から得られたアスファルテン量のきわめて小さなストレートアスファルトである。

この結果から明らかにアスファルトのぜい化点の低いものは、他の条件が一定ならば混合物に低い T_B をもたらすことが結論される。

なおフラスぜい化点は -20°C 以下では高い精度の測定が得難いこともあって、本研究においては基準温度としてはあまり用いなかった。

b) P.I. が同一で針入度級が変化する場合

レオロジー定数の一つである P.I. が一定で、針入度が変化する場合について前項で述べたと同一の混合物について検討し、表-3 に示す結果を得た。P.I. の若干の差を補正¹⁰⁾すると、ぜい化点は、針入度が小さくなるにつれて高温側に移動する。この結果は軟化点が上昇すると T_B もまた上昇することを示し、軟化点と T_B の差は補正後 42~44°C とほぼ一定になる。この結果 P.I. を一定とした場合、針入度が低下、軟化点が上昇すれば、 T_B もまた平行的に移動して、高温側に移動することがわかる。すなわち、変形抵抗の増大をもたらす軟化点の上昇は、P.I. が一定なかぎり、ぜい化点の上昇すなわちぜい性領域の拡大をもたらすことを意味する。こ

表-3 P.I. が同一で針入度が異なる場合のマスチックアスファルト* のぜい化点の変化 ($\dot{\epsilon}=2.3 \times 10^{-1} 1/sec$)

番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec)	54	69	93	106
軟化点 (°C)	54.3	52.0	47.8	47.1
P.I.	0	0	-0.2 (0)**	+0.1 (0)**
混合物のぜい化点 (°C)	10	7.5	7.5 (6.5)**	5 (5.5)**

* Type E 混合物

** かつこ内は P.I. の 0.1 の変化に対し、0.5°C のぜい化点の差として補正した数値¹⁰⁾

れらは在来の経験的知識とよい対応関係にある。

c) 針入度級, P.I. の両方が異なる場合

原料油にごく少量のリン系触媒を加えてブローイング操作を行うことにより、比較的大きい針入度のもので P.I. を高めたアスファルトを得ることができる。これは通常触媒アスファルト (C.B. アスファルト) の名でよばれている¹¹⁾。この方法によれば広く性状の異なるアスファルトを比較的容易に得ることができるため、本研究では、原油性状を一定にして P.I. ならびに針入度級の変化したものを得た。表-4 は比較のためのストレートアスファルトをも含め、これらのアスファルトの性状を示したものである。

アスファルトコンクリートに関し、ひずみ速度を $4.5 \times 10^{-1} 1/sec$ にとって曲げ試験を行い、横軸に基準温度と試験温度の差を、また縦軸に σ_b ならびに ϵ_b の対数をとって 図-7 に示すような結果を得た。なお T_B は先の表-4 に示しておいたが、この T_B は一見針入度級にも軟化点にも無関係であり、 T_B の差についてそれを十分に説明することは困難である。しかし T_B を基準温度からの温度差として表現するとき、その温度差は P.I. = 4.0 のとき 68°C, P.I. = 2.6 のとき 53°C, P.I. = -0.5 のとき 30°C と P.I. の大なるほど、基準温度か

表-4 P.I. を変化したアスファルトの性状およびアスファルトコンクリートのぜい化点

番号	CB-48	CB-61	CB-81	CB-84	St-93*
針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec)	48	61	81	84	93
軟化点 (°C)	69.0	60.0	52.3	67.9	46.8
P.I.	+2.6	+1.6	+0.7	+4.0	-0.5
フラスぜい化点 (°C)	-22	-21	-20	-34	-21
混合物のぜい化点 (°C)	16	14	12	0	17

* ストレートアスファルト

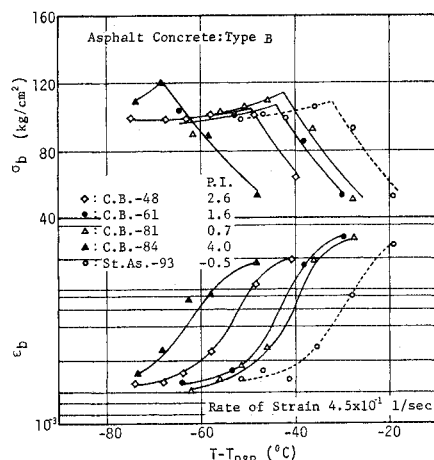


図-7 曲げ強さ、破壊時のひずみと温度 (試験温度-軟化点) の関係

ら遠くはなれた位置に T_B が存在していることが知られる。この結果はアスファルトのレオロジー性状が混合物の性状を大きく支配していることを物語り、その変化は P.I. に依存していることがわかる。

さらにここで得た結果を確認する意味から、P.I. のごく小さいストレートアスファルトから、P.I. が 5 に近いものまで数多くのアスファルトを用い、マッシュクアスファルトとして、各々のぜい化点を求めてみた結果が 図-8 である。

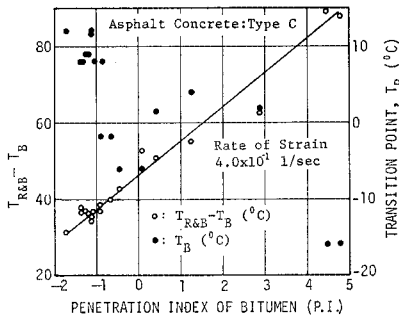


図-8 使用アスファルトの針入度指数 (P.I.) と軟化点とぜい化点の温度差ならびにぜい化点との関係

図は横軸に P.I. を、縦軸に軟化点と T_B の温度差および T_B の 2 つを目盛っている。黒マルで示したものは、単純に P.I. と T_B との関係を示したものであるが、この図で見ると、その相関関係は明らかではない。これは先に述べたように針入度級の差を考慮に入れることのできない処理の方法であることに基づいている。一方白マルは軟化点と T_B の温度差として処理したものであり、P.I. との間に直線的な関係が存在することが示されている。

これらの結果は混合物の性状のアスファルトの性状への依存性を示したものであり、そのなかで P.I. が非常に大きな役割を果していることを示していると受けとられる。

したがってここでは、混合物のぜい化点は使用アスファルトの P.I. に示されるアスファルトのレオロジー性状に依存して規則正しく移動するものと結論される。

(3) アスファルトにゴムを添加した場合¹²⁾

本研究では、混合物に S.B.R. (スチレン・ブタジエン・ゴム) ラテックスを添加し、その性状の変化を追って見た。なおアスファルトの性状はゴムを添加したものについて求め、混合物の作製にあたってはプラント混合方式 (混合時にラテックスを添加する) をとった。なお本研究で用いたラテックスの固型分は 50% であり、ここでいうゴム添加量はすべて、アスファルトとの重量比として固型分のみを示している。

表-5 S.B.R. を添加したアスファルトの性状およびアスファルトコンクリートのぜい化点

ゴム添加量*	0%	3%	5%	7%
針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec)	93	85	78	70
軟化点 (°C)	46.9	52.7	56.3	58.9
P.I.	-0.5	+0.9	+1.5	+1.8
混合物のぜい化点 (°C)	15	16.5	16	16

* 添加量はいずれも固型分を示す

著者らの試みによれば、ゴムを添加した混合物の性状は、ゴムの種類、使用するアスファルトの性状に大きく依存している。したがって、ここで述べるものは単なる一例にしすぎないことを断っておく必要があろう。

表-5 は試験に使用したアスファルトの一般性状を示したものであり、これによれば、ゴム添加量により相違はあるが、いずれにも針入度の低下、軟化点の上昇が示されている。

ゴムを添加する手法は、ゴムを添加した後の針入度 (または軟化点) を一定にする方法と、一定針入度のものにゴムを添加する方法とがあるが、ここでは後者をとっている。解析の手法は前節に用いた基準温度からの温度差として処理するものであるが、厳密にはゴムを添加したアスファルトの軟化点と、ストレートアスファルトのそれとは力学的に若干異なるものらしく、いまだ疑問が残る方法であり、今後の詳細な検討が期待される。

図-9 はアスファルトコンクリートに関する実験の結果である。 T_B は表-5 に示したが、ゴムを添加することによって T_B そのものはほとんど変化しないとしたほうがよさそうである。

基準温度からの温度差で T_B を表現するとき、軟化点が上昇した分だけが、差として示される。このとき T_B は明らかに基準温度よりはなれた位置に存在し、その基準温度からのなれ方はほぼ完全にゴム添加量に

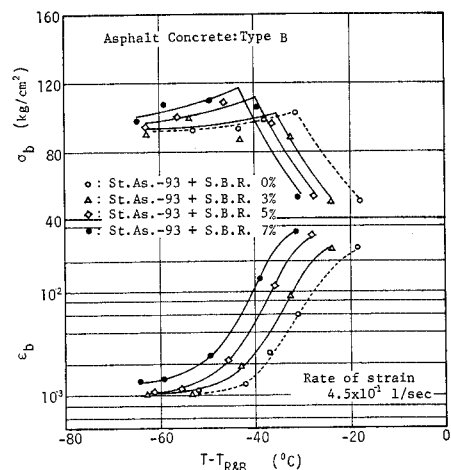


図-9 ゴムを添加した場合の曲げ強さ、破壊時のひずみと温度 (試験温度-軟化点) の関係

依存していると思われる。これは等変形温度とぜい化点にはさまれる温度幅の拡大を意味しており、異なるコンシステンシーのアスファルトに異なる量のゴムを添加して、同一軟化点を得たとき、混合物のぜい化点は、ゴム量の多いものほど低温側にあることを示していると解釈される。

一方破壊ひずみをみるに、S字カーブで示される ϵ_b -温度曲線は、ゴムを添加してもほぼ同一の形状であり、上限、下限値にはそれぞれ大きな差は存在しないように見受けられる。したがってゴムの添加が本質的に大きな破壊ひずみを与えるとは考えがたい。しかしこの ϵ_b -温度曲線が軟化点から遠く離れていることは、この曲線の存在する温度域内でのある一定温度でみかぎりゴムを添加したものは大きな破壊ひずみをもつということもできる。

これらのゴム添加による混合物の性状変化は、ここに述べたように、混合物が本質的にゴム化される等のことによるものではなく、ゴムの添加がアスファルトのレオロジー性状を若干変化させ、そのアスファルトの性状の変化が混合物の力学的性状に変化をもたらすものと思われる。

(4) 針入度級がほぼ同一の各種のアスファルトを比較する場合

前項までに、ストレートアスファルト、触媒を用いたアスファルト、ゴムを添加したアスファルトなどについて検討を試みたが、図-10は表-6に示すような各種のアスファルトに関し、アスファルトコンクリートを用いて実験を行った結果である。各アスファルトとも、P.I.によってその性状を表現できるように思われる。しかしこれらをすべて P.I.をもって表現してしまうことには先に述べたように若干の疑点があり、より詳細になんらかの指標を見出すための研究が必要となる。

(5) まとめ

本節においては、各種の性状の異なるアスファルトを用い、それがいかに混合物のレオロジー性状を支配するかについて実験研究を行い、おおよそ以下に示すような結論を得た。

(1) アスファルトの性状は混合物のレオロジー性状に大きな影響を与える。

(2) σ_b , ϵ_b および S_b -温度曲線の形状はアスファルトの種類、性状のいかんにかかわらず、ほぼストレートアスファルトと同一であり、ただ温度軸上での位置が異なるのみである。

(3) ゴム添加アスファルトなどについてはなお検討を必要とするが、アスファルトの P.I. が混合物の性状

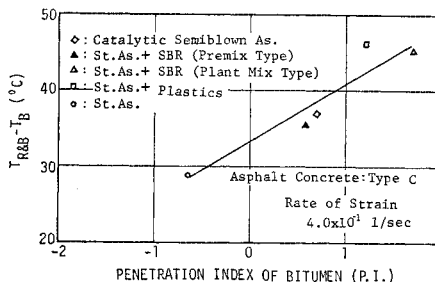


図-10 各種のアスファルトを用いたアスファルトコンクリートの $T_{R \& B} - T_B$ と針入度指数との関係

表-6 著しく性状の異なる5種のアスファルトの性状およびアスファルトコンクリートのぜい化点

添加物または操作	ストレートアスファルト	S.B.R. 5%*	S.B.R. 3%**	プラスチック	触媒アスファルト
針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec)	89	74	113	87	81
軟化点 (°C)	46.8	58.1	48.0	53.9	52.3
P.I.	-0.7	+1.7	+0.6	+1.2	+0.7
混合物のぜい化点 (°C)	17.5	12.5	2.5	7.5	15.0

* プラント混合型
** プレミックス型

を支配する重要な因子の一つに数えられる。

(4) 温度を基準温度からの温度差として表現するとき、針入度級を考慮することなく、そのレオロジー性状を求めることができ、その性状をよく把握できる。

6. アスファルト混合物の配合の影響

アスファルト混合物の力学的性状が、骨材の粒度組成ならびにアスファルト量に支配されて変化することは広く知られており、本論文においてもしばしば触れた。ここでは、 $C_v=0\sim 0.86$ の混合物に関し、3つのひずみ速度で T_B がいかに移動するかについて検討を試みた。

図-11によれば、各ひずみ速度において、アスファルト単体が最も低い T_B を示し、 $C_v=0.6$ を境にして急激に上昇している。これを実用の範囲内に限定して考えると、もしかりに混合物の粒度を一定にとるとき、

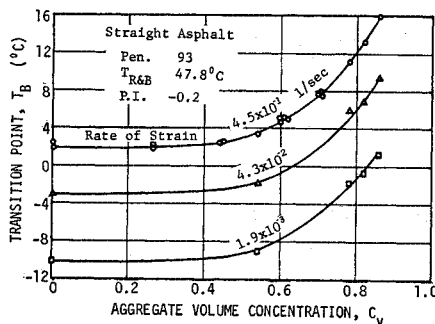


図-11 ぜい化点に及ぼす骨材体積率の影響

選択できるアスファルト量の変化の幅は±1%程度（容積にして±2.6～2.7%程度）であり、その程度の差は1°Cまたは2°C程度の T_B の移動をもたらすのみであり、あまり大きな差としてとりあげるには及ばないと思われる。しかし骨材粒度をも変化させる場合にはぜい化点の数°Cの低下は期待できそうであり、寒冷地において C_v が小さいものが冬季間のパフォーマンスがよいとされるのとよい対応を示している。

また図によれば、 C_v による T_B の差はひずみ速度の変化によって多少異なるように見られるが、その変化量は比較的小さくあまり明瞭ではない。

7. 結 論

以上アスファルト混合物の低温領域における破壊時のレオロジー挙動に関し、各種の実験を行い、おおよそ次に述べる結論を得た。

(1) 混合物の破壊にはいくつかの規則性が見出され、その多くはレオロジー論により説明される。

(2) 混合物の転移領域での破壊において、 σ_b , ϵ_b , S_b は C_v に大きく依存し、各 C_v においてほぼ一定の数値をもって示される。舗装用アスファルトコンクリートの $C_v=0.86$ 程度の混合物に関しては、

$$\sigma_b = (115 \pm 15) \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_b = (5 \pm 1) \times 10^{-3}$$

$$S_b = (2 \pm 1) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

が、ぜい化点において与えられる。したがってぜい化点は混合物の特性値の一つと考えられる。

(3) σ_b , ϵ_b , S_b と温度との関係を示す曲線はあらゆるアスファルト、混合物の配合、ひずみ速度で完全に対応し、温度軸上を与える条件の変化にしたがって移動する。

(4) 規則的なぜい化点の移動をもたらす因子として次のものをあげることができる。

- ひずみ速度
- 材料の配合（骨材体積率、アスファルト量など）
- アスファルトのコンシステンシーならびにそのレオロジー性状、特にP.I.
- ゴムなどの添加

8. おわりに

以上主としてきれつなどが問題となる低温領域における破壊のレオロジーについて論じてきたが、混合物の破壊現象は混合物の研究全体からみれば、ごく一部分を占めるにすぎず、他のいろいろな性状とあわせて関連を論ずることが重要である。この意味から特に、

- 高温での流動性との関係
- 動的性状および疲労性状との関係
- より基礎的なものとして応力緩和特性との関係
- 材料の劣化性状との関係

などの追及が重要な今後の課題となると思われる。a), b)に関しては、本研究とほぼ並行して研究を行ってきたので、いずれ機会をみてご批判を得たいものと考えている。

なお本研究にあたり、数多くのアスファルトの試作にご尽力いただき、またご討議をいただいた三菱石油研究所の飯島 博、丸善石油研究所の堀尾哲一郎の両博士に厚く感謝の意を表し、併せて約10年にわたって研究室の多くの諸君に実験に関して多大の協力をいただいたことに対し厚くお礼申上げるものである。

なお本研究には数か年にわたり文部省科学研究費を使用させていただいた。付記して感謝の意を表するものである。

付表 混合物の配合表(%)

混合物のタイプ ふるい目の 開き(mm)	アスファ ルトコン クリート タイプA	アスファ ルトコン クリート タイプB	アスファ ルトコン クリート タイプC	サンドア スファ ルト タイプD	マスタック アスファ ルト タイプE
20		100			
15	100	89	100		
10	84	76	80		
7	74	67	70		
5	65	60	60		
2.5	48	47	45	100	
1.2	36	38	35	90	
0.6	25	27	25	80	
0.3	17	14	16	59	100
0.15	12	9	9	15	28
0.074	7	6.9	5	10.5	25
アスファルト量(%)	5.7	5.8	6.0	8.5	25
針入 (25°C, 100 gr, 5 sec)	81	93	89	81	81
軟化点(°C)	47.3	46.8	46.8	47.3	47.3

参 考 文 献

- 森吉昭博・上島 壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，第210号，pp. 77～84，1973年2月。
- 上島 壮・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究，土木学会論文報告集，第221号，pp. 73～80，1974年1月。
- Sugawara, T. : Mechanical Response of Bituminous Mixture under Various Loading Conditions, Proc. 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 343-353, Sept. 1972 (London).
- Poel, C. van der : A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, Part. 5, pp. 221-36, May, 1954.
- Smith, T.L. : Viscoelastic Behavior of Polyisobutylene under Constant Rate of Elongation, Journal of

- Polymer Science, pp. 89-100, Vol. 20, 1956.
- 6) 笠原 篤・菅原照雄：アスファルト混合物の動的応答に関する研究，土木学会論文報告集，第 215 号，pp. 75-83，1973 年 7 月。
 - 7) 笠原 篤・菅原照雄：アスファルトの性状とアスファルト合材の性状の関係について，石油学会誌，第 15 巻，第 11 号，pp. 52-55，1972 年 11 月。
 - 8) 菅原照雄ほか：アスファルト合材の感温性状，第 5 回日本道路会議論文集，1959 年 10 月。
 - 9) 松浦精一ほか：アスファルト合材の Rutting に関する基礎的研究—第 2 報—：土木学会第 25 回年次学術講演会にて発表，昭和 45 年。
 - 10) 上島 壯・森吉昭博：アスファルト合材のぜい性破壊に関する研究，土木学会第 25 回年次学術講演会にて発表，昭和 45 年。
 - 11) 飯島 博：改質アスファルトの動的粘弾性，石油学会誌，第 15 巻，第 5 号，pp. 379-384，1972 年 5 月。
 - 12) 中島昭雄・笠原 篤・菅原照雄：ゴムを添加したアスファルト混合物の性状評価法に関する研究，道路，1973 年 6 月号，pp. 67-73。

(1974.4.15・受付)