

# アスファルトの性状のアスファルト混合物の 力学的性状に及ぼす影響

## INFLUENCE OF PROPERTIES OF ASPHALTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THEIR MIXTURES

菅原 照雄\*・笠原 篤\*\*

By Teruo SUGAWARA and Atsushi KASAHARA

### 1. 概 説

本研究は、アスファルト混合物（以下単に混合物と称する）の性状に影響をおよぼす種々の因子のうち、特にアスファルトの物理的性質を取り上げ、

a) アスファルトのコンシステンシーが混合物の力学的性状に及ぼす影響を与えるか、

b) アスファルト舗装において混合物が具備すべき力学的性状の望ましい方向を与えるためには、どのような性状を示すアスファルトが好ましいのか、

c) 特に最近世界的に関心が高まりつつある高粘度アスファルトを用いた混合物の力学的性状はどのようなものになるか、

などを明らかにすることを目的としている。

アスファルトの物理的性質は実用上、針入度、軟化点、伸度、セイボルトフェロール粘度、フラスゼい化点など工学的な方法で表わされている。しかしこれらのおおのはアスファルトの性質のうち、それぞれごく狭い温度もしくはコンシステンシー領域での性質しか表現できず、また表わされる量の次元も異なっている。これらのことからアスファルトのコンシステンシーを広い領域において適切に表現するには同一の尺度（次元）が必要となるが、もっとも合理的であると思われるものとしては、絶対粘度 (poises) もしくはスティフネス ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) などをあげることができる。またぜい性領域におけるコンシステンシーを絶対粘度で、流動領域におけるそれをスティフネスで表現してみても、そこにどれだけの意味があるかとの疑問も生じてくる。そこで常温以下におけるコンシステンシーをスティフネスで、常温以上におけるそれを絶対粘度で表わすのがより適切であると思われる。

ここではアスファルト舗装が遭遇する温度領域の上限近辺の温度、すなわち  $45\sim 60^\circ\text{C}$  でのアスファルトの絶対粘度を測定するためにフォーリングプランジャ (Falling Plunger) 方式の比較的簡単な粘度測定器を試験的に製作し粘度測定を行い、アスファルトのコンシステンシーを絶対粘度でとらえるとともに、針入度および軟化点がいかなる意味を持っているかを検討し、アスファルトの粘度、針入度、軟化点、針入度指数などが混合物の力学的性状に及ぼす影響を、またその影響に及ぼす規則性が存在するかを明らかにしようとした。

混合物の性状を総合的に論ずるために、a) 変形を対象として流動性状、b) き裂を対象として破壊性状、c) 荷重分散性能を対象として変形係数、d) 施工性、などが問題となる領域に区別し、そのおのおのについて検討する必要がある<sup>1)</sup>。ここでは流動に関してはホイールトラッキング試験から得られる動的安定度、破壊に関しては定ひずみ速度曲げ試験から得られる破壊強さ、破断ひずみおよびぜい化点と繰返し載荷試験から得られる複素弾性率の低下率および疲労破壊回数、変形係数に関しては強制振動非共振法から得られる複素弾性率ならびにクリープ試験から得られるクリープコンプライアンス、施工性に関してはアスファルトの粘度および混合物の空隙率などをもって論じた。

### 2. 試験材料

本研究においては、アスファルトのコンシステンシーを大きく変化させたものを対象にしていることから、採用したアスファルトとしてはストレート系3種およびブローン系12種の計15種であり、それらの性状は一括して表-1に示した。ここに示したアスファルトのうち Straight Asphalt とあるのは在来通常用いられてきたものであり、Semi-blown Asphalt Type A とあるのは若干の Air Blown 操作を加えて製造したものの、

\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 北海道大学助手 工学部土木工学科

表-1 アスファルトの性状

		Penetration (100 g, 5 sec, 25°C)	Softening Point TR&B(°C)	Penetration Index	Viscosity (poises)			Equi-viscous Temperature (°C)		
					at 45°C	at TR&B	at 60°C	T <sub>equi</sub> <sup>1)</sup>	Mixing Temp. <sup>2)</sup>	Rolling Temp. <sup>3)</sup>
STRAIGHT ASPHALT	ST-1 ●	50	51.0	-1.0	5.56×10 <sup>4</sup>	1.81×10 <sup>4</sup>	4.85×10 <sup>3</sup>	50.8	160	112
	ST-2 ●-	72	48.0	-0.9	2.89×10 <sup>4</sup>	1.75×10 <sup>4</sup>	2.94×10 <sup>3</sup>	47.0	154	105
	ST-3 ●	98	44.0	-1.2	1.42×10 <sup>4</sup>	1.56×10 <sup>4</sup>	1.50×10 <sup>3</sup>	43.0*	151	102
SEMI-BLOWN ASPHALT TYPE A	SB-A-1 ○	36	57.0	-0.4	1.51×10 <sup>5</sup>	2.09×10 <sup>4</sup>	1.36×10 <sup>4</sup>	57.2	175	119
	SB-A-2 /○	50	56.5	+0.3	1.14×10 <sup>5</sup>	1.40×10 <sup>4</sup>	7.95×10 <sup>3</sup>	54.4	156	110
	SB-A-3 -○	50	54.0	-0.3	6.69×10 <sup>4</sup>	1.65×10 <sup>4</sup>	5.23×10 <sup>3</sup>	52.5	158	109
	SB-A-4 \○	52	52.0	-0.7	5.50×10 <sup>4</sup>	1.70×10 <sup>4</sup>	5.15×10 <sup>3</sup>	50.8	162	113
	SB-A-5 ○	67	50.0	-0.5	3.26×10 <sup>4</sup>	1.13×10 <sup>4</sup>	2.15×10 <sup>3</sup>	47.5	144	101
	SB-A-6 ○/	69	50.5	-0.3	3.24×10 <sup>4</sup>	1.16×10 <sup>4</sup>	2.58×10 <sup>3</sup>	47.5	148	98
	SB-A-7 ○-	71	51.0	-0.1	2.89×10 <sup>4</sup>	1.03×10 <sup>4</sup>	2.46×10 <sup>3</sup>	47.0	156	105
	SB-A-8 ○\	71	57.0	+1.3	1.43×10 <sup>5</sup>	1.39×10 <sup>4</sup>	8.13×10 <sup>3</sup>	54.8	156	110
	SB-A-9 ○	72	50.5	-0.1	3.42×10 <sup>4</sup>	1.36×10 <sup>4</sup>	2.68×10 <sup>3</sup>	47.7	153	106
	SB-A-10 ○	72	52.0	+0.2	5.02×10 <sup>4</sup>	1.52×10 <sup>4</sup>	4.02×10 <sup>3</sup>	50.2	159	110
SEMI-BLOWN ASPHALT TYPE B	SB-B-1 ■	87	57.5	+2.0	1.41×10 <sup>5</sup>	1.28×10 <sup>4</sup>	8.52×10 <sup>3</sup>	54.5	164	114
	SB-B-2 ■	91	51.0	+0.7	3.83×10 <sup>4</sup>	1.20×10 <sup>4</sup>	2.93×10 <sup>3</sup>	48.3	156	107

1) 2×10<sup>4</sup> poises 2) 2 poises 3) 30 poises \* by extrapolated

Semi-blown Asphalt Type B とあるのは Air Blown の過程において触媒を用いたものを示している。

ここに用いたアスファルトは数多くの原油から試験的に製造されたものであり、かつその製法もかなり変化に富んでいる。しかしここでは原油による差、製法による差を考慮することなく、アスファルトの物理的性質のみを取り上げてデータの整理を試みた。

表-2 密粒度アスファルト コンクリートの粒度組成

Sieve Opening (mm)	Passing (%)
13.0	100
10.0	92.0
7.0	75.0
5.0	68.0
2.5	47.0
1.2	36.0
0.6	25.0
0.3	14.0
0.15	7.2
0.074	6.0

本実験において採用した混合物のタイプは密粒度アスファルトコンクリートであり、骨材の粒度組成は表-2に示したとおりである。なお混合物中のアスファルト量は重量百分率で6%である。

### 3. アスファルトのコンシステンシー

アスファルトの粘度は混合時からぜい性破壊をおこす低温時までを考えると、およそ 10<sup>9</sup> のオーダーにもおよぶような広範囲の値をとる。このような広範囲な粘度を単一機種の粘度計により測定することは不可能であることから、中島ら<sup>2)</sup>は Rotating Coaxial Cylinder Viscometer および Sliding Plate Micro-viscometer を用いアスファルトの絶対粘度を測定し、詳細な検討を行っ

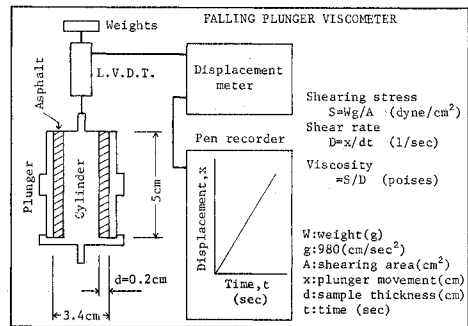


図-1 フォーリング・プランジャの系統図

た。しかし舗装体が遭遇する上限近辺の温度領域すなわち 45~60°C でのアスファルトの粘度の高精度の測定は前述の 2 機種のみではかなりの困難を伴う。ここでは混合物の流動抵抗性が問題となる 45~60°C でのアスファルトの粘度を簡便に測定しうるフォーリングプランジャ方式の粘度測定器<sup>3)</sup>を試験的に製作し<sup>4)</sup>、粘度測定を行った。その測定装置の系統図を図-1 に示した。粘度測定は 45°C, 60°C およびそれぞれのアスファルトの軟化点においてせん断応力の大きさを 6 点変化させることによりせん断速度を 10<sup>-2</sup>~10<sup>9</sup> (1/sec) 程度変化させてレオロジーダイアグラムを描き、これから仕事量一定点として 1000 erg/sec·cm<sup>3</sup> での粘度を求めた。一例として SB-A-7 (針入度 71, 軟化点 51°C) のレオロジーダイアグラムを図-2 に示した。

フォーリングプランジャ方式により得られたせん断応力とせん断速度の関係は図に示されているように直線で

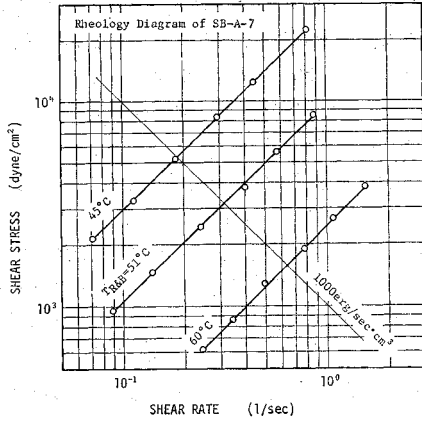


図-2 レオロジーダイアグラム

表わされ、また再現性に関しては 20 個の同一試料について、温度 60°C、せん断応力  $3.84 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  において粘度を測定した結果、粘度の変動係数は 4% 程度であったことから、工学的利用に関しては十分の精度をもつものと思われる。表-1 には 15 種のアスファルトについてこのようにして得られた 45°C、60°C、軟化点における粘度の測定結果を示してあり、また混合および転圧温度は 80~180°C において Rotating Coaxial Cylinder Viscometer により絶対粘度を求め、温度-粘度関係から求められたものである。また  $T_{e\text{qui}}$  はフォーリングプランジャによる温度-粘度関係から  $2 \times 10^4$  poises における等粘度温度として求められたものである。軟化点における粘度についてはすでに筆者らが明らかにした<sup>5)</sup>、表-1 が示すように軟化点粘度は  $(1 \sim 2) \times 10^4$  poises 程度であり、かならずしも等粘度ではない。本研究では基準温度として、変形抵抗に関しては粘度という観点から求めた等粘度温度とアスファルトの工学的性状表現法としての軟化点の、いずれも温度で表現される 2 つのものを選び、破壊に関しては軟化点を採用した。さらに針入度、軟化点、針入度指数などで表現されるアスファルトのコンシステンシーと混合物の性状との関連

性を求めた。

#### 4. 変形抵抗性

アスファルト舗装のわだち掘れと定量的には明確でないものかなりの相関があるとされているホイールトラック試験を用いて混合物の高温における流動抵抗性を求め、それにアスファルトのコンシステンシーがいかにかに寄与しているかを詳細に検討した。

材料を表-1 に示した混合温度において混合し、 $30 \times 30 \times 5 \text{ cm}$  の鋼製型枠で転圧温度においてローラコンパクタで転圧して作製された供試体を用い、45°C および使用したアスファルトの軟化点温度において試験（荷重 55.1 kg、走行速度 42 pass/min）を行い、各混合物の動的安定度（Dynamic Stability, pass/mm）を求めた。

##### (1) 針入度、軟化点と動的安定度との関係

工学的表現法にもとづくアスファルトの性状と混合物の動的安定度との関係を求め 図-3 に示した。図-3 の (a)、(b)、(c) は 45°C における動的安定度と針入度、軟化点、針入度指数との関係を、また (d) は軟化点温度における動的安定度と軟化点の関係を示している。

##### a) 針入度との関係

図-3 の (a) より、針入度 70 前後のアスファルトを眺めるとき、動的安定度は  $(1.4 \sim 4.2) \times 10^3$  pass/mm なる値を示し、それが大きくばらついていることから、針入度と混合物の流動抵抗性との間に単純に針入度の大きなものは安定度が小さいという表現はできない。すなわち 25°C におけるコンシステンシー（針入度）からわざわざ 20°C はなれた温度（45°C）においてさえも、25°C 針入度から混合物の流動抵抗性を推測することにはかなり無理がある。

##### b) 軟化点との関係

図-3 の (b) より、45°C における動的安定度と軟化点の関係は片対数紙上においてほぼ直線で示され、軟化

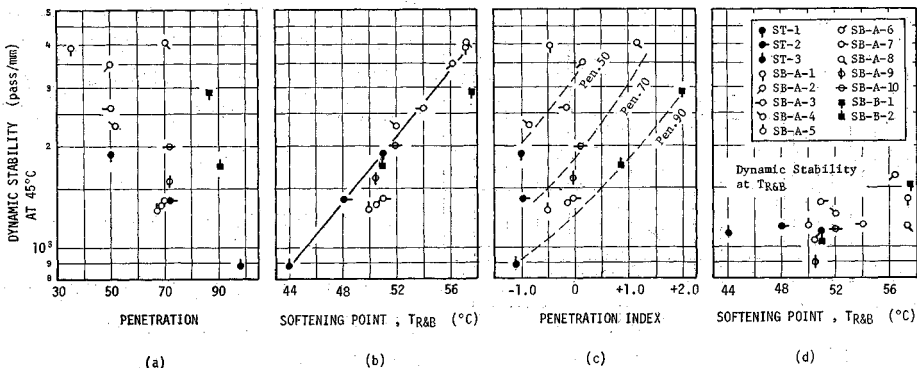


図-3 アスファルトの性状と混合物の動的安定度との関係

点が 44°C から 57°C に変化すれば動的安定度は  $9 \times 10^2$  から  $4 \times 10^3$  pass/mm に上昇する。また (d) より軟化点温度における動的安定度は軟化点 44~57.5°C のどのアスファルトに用いても  $(0.9 \sim 1.6) \times 10^3$  pass/mm なる値を示し、実験誤差などを考慮するならばほぼ同じ値を示しているといえる。軟化点は工学的にはほぼ等コンシステンシー温度であるとされていることから、軟化点における動的安定度はほぼ同一であるとしても差し支えないであろう。

### c) 針入度指数との関係

図-3 の (c) は針入度をパラメーターとしたとき、針入度指数が大なものほど動的安定度は大なることを示している。このことは同一針入度であるならば軟化点が高いものほど針入度指数は大なることから当然といえる。

以上のことからアスファルトの工学的なコンシステンシーの表現法である針入度、軟化点などを用いて混合物の動的安定度を論ずるとき、もっとも密接な関係にあると見られるものは軟化点である。すなわち軟化点は表-1 にも示されているように粘度が  $(1 \sim 2) \times 10^4$  poises 程度の等コンシステンシー温度としてもよいことと、舗装用アスファルトの軟化点はほぼ 40~60°C の範囲にあることから 45~60°C における混合物の動的安定度と密接な関係にあることは当然であるとしてもよいであろう。

## (2) 粘度と動的安定度との関係

粘度にもとづくアスファルトの性状と混合物の動的安定度との関係を詳細に検討すべく、45°C におけるアスファルトの粘度と 45°C における動的安定度との関係を図-4 の (a) に示し、絶対粘度  $2 \times 10^4$  poises における温度 (等粘度温度) と 45°C における動的安定度との関係を図-4 の (b) に示した。

### a) 粘度との関係

混合物の変形抵抗性は粒度組成およびアスファルト量

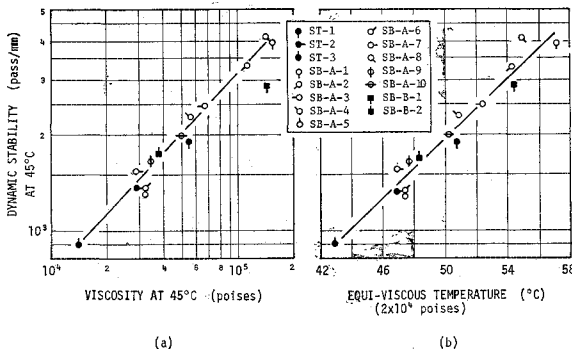


図-4 アスファルトの粘度と混合物の動的安定度との関係

が一定のとき、アスファルトの粘度によって支配されることは容易に推測できる。45°C における動的安定度と 45°C 粘度は両対数紙上でほぼ直線として示され、粘度 1 桁の上昇は動的安定度を約 4.4 倍にするといえよう。

### b) 等粘度温度との関係

45°C における動的安定度と等粘度温度 ( $2 \times 10^4$  poises) との関係は、片対数紙上でほぼ直線として示され、両者の関係は軟化点-動的安定度関係に比し変動は小さい。すなわち軟化点-動的安定度関係にみられる直線からかなりはなれた 4 つの点などが、図-4 の (b) できわめてその直線に近づいているなど軟化点-動的安定度関係よりも密接な関係が存在すると見てもよいであろう。

これらの結果は粘度が混合物の変形抵抗性を支配するきわめて大きな要因であることを示している。

## (3) ま と め

工学的表現法によるアスファルトの性状と混合物の動的安定度との関係およびアスファルトの粘度と動的安定度との関係から以下に述べる結論を得た。

a) 工学的表現法にもとづく性状においては、軟化点をもっとも混合物の変形抵抗と密接な関連をもつ。

b) 針入度は針入度指数を介し混合物の変形抵抗と関連をもつ。すなわち針入度指数が同一の場合針入度と動的安定度の間には明らかに相関があるものと思われる。

c) 45°C における絶対粘度と動的安定度の間には両対数紙上で直線関係にある。このことは粘度が変形抵抗を支配することを物語っている。

d) 等粘度温度と動的安定度の間にも片対数紙上で直線関係があり、等粘度温度-動的安定度関係は軟化点-動的安定度関係に比較し、その変動は小さい。

以上のことから、混合物の高温時の変形抵抗性は粒度組成、骨材性状ならびにアスファルト量に影響されることはいうまでもないが、それらが一定のときアスファルトの粘度が支配要因となる。それをもっとも適切に表現するものは絶対粘度であるが、工学的見地からそれを軟化点におきかえて考えても大きな誤りにはならず、一般的な傾向把握としては軟化点が十分利用できる。一方針入度はそれのみをもって変形抵抗を推測する手段とはなり難いといえる。

## 5. 混合物の施工性とニーデング作用

アスファルト混合物の施工性の問題の多くの部分は現場研究をまたなければならないが、その施工性のかかえている基礎的なものについては室内研究で明らかにすることができるとと思われる。

施工性の問題点はアスファルトと骨材との混合、混合物の転圧の2つに帰着すると考えられるが、ここでは転圧の問題を締め固められた混合物の空隙率としてとらえ、アスファルトのコンシステンシーが混合物の空隙率に及ぼす影響を与えるかを検討することを試みた。すなわち施工性が悪ければ十分に混合物は締め固められず、供用されれば、交通荷重によりニーデング作用をうけることから、ここではニーデングによる空隙率の変化を検討している。

筆者らの混合物の製作手法は、オイルバスを持つミキサで2ポアズ温度において材料を加熱混合し、鋼製型枠に混合物をつめ、ローラコンパクタで30ポアズ温度において転圧し、その後45°Cにおいてホイールトラッキング試験機を用いてトラバース(10cm/分)をかけニーデング作用を与える方法を採用している。本研究における配合設計はローラコンパクタで転圧した後の空隙率を6~7%、ニーデング作用を与えた後のそれを3~4%程度になるように行った。

図-5はコンシステンシーの異なった7種のアスファルト(SB-A-2, 5, 6, 7, 9, SB-B-1, 2)について締め固めたアスファルト混合物の空隙率とニーデング作用を与えたときのアスファルトの粘度との関係を示している。なおここに示した空隙率は30×30×5cmのブロックのものであり、力学試験に用いた6面カットの供試体に比し、型枠に接する面は十分に締め固められないことから、空隙率は1~1.5%程度大きな値をとる。

各種アスファルトを用いた混合物をローラコンパクタで締め固めたときの空隙率の平均値は6.7%であり変動係数は約3%を示した。空隙率の分散の程度をみるために図-5の上部の破線で囲まれている部分に空隙率の値を示してある。すなわち針入度50~91, 軟化点50.0~57.5°C, 針入度指数-0.5~+2.0の範囲のアスファルトを用い、混合温度144~164°C, 転圧温度98~114°Cとおのおの異なっても、締め固められた混合物の空隙

率はほぼ同一であるといえる。

また図中の2本の実線はそれぞれ45°Cおよび軟化点においてニーデング作用(交通による締め固めを想定したもの)を45分, 90分与えたときの空隙率とニーデング作用をうけているときのアスファルトの粘度との関係を示している。図をみれば混合物の空隙率はニーデング作用をうける時間が長いほど、そのときのアスファルトの粘度が小さいほど減少することがわかる。このことはニーデング作用をうけることにより混合物はさらに締められ、その程度は粘度によって異なることを表わしており、アスファルトの粘度が小なものほどよく締まることを示している。

### 6. 破壊性状

混合物はわずかな環境条件, 荷重条件の変化で極端に異なる破壊モード, すなわち a) ぜい性破壊, b) 流動を伴う破壊を示し, かつ強さおよび破壊時のひずみも大きく変化することをすでに筆者らは明らかにしている<sup>6), 7)</sup>。

ここでは混合物の破壊性状を“ぜい化点”<sup>8)</sup>を用いて論じ, 各種アスファルトのコンシステンシーが混合物のぜい化点に及ぼす影響を与えるかについて検討することを試みた。実験はインストロン型万能試験機を用い, 温度-10~+30°C, ひずみ速度 $1.88 \times 10^{-2}$  (1/sec)において, 供試体(2.5×2.5×25cm)の中央に載荷する一定ひずみ速度の曲げ試験(スパン20cm)を行った。

曲げ強さ-温度曲線において極大を示す温度すなわちぜい化点を求め, ぜい化点( $T_B$ )と針入度(Pen.), 軟化点( $T_{R\&B}$ ), 針入度指数(P.I.)などの関係を図-6の(a), (b), (c)に示した。図をみるに針入度との間には軟化点をパラメーターとし, 軟化点との間には針入度をパラメーターとした関係があるようである。針入度指数との間には針入度をパラメーターとした関係があり, 同一針入度では針入度指数が大(軟化点が高いことを意味する)となればぜい化点は低くなる。これらについては筆者らがすでに明らかにしたものと同様であり<sup>8)</sup>, 本研究においてさらに広範囲にその関係が存在することが確かめられた。

図-6の(a)をみるに, 軟化点を一定にした場合, 針入度の小さなもののぜい化点は高くなる。ぜい化点の高いことは実用条件下において混合物のひび限度が小さい領域が広いこと, すなわちき裂に対する危険領域が広いことを意味している。一方針入度を同一にとった場合軟化点の低いもののぜい化点は高くなり同様のことがいえる。このようにみれば針入度はき裂の発生に対し, 密接な関係をもっと推論される。

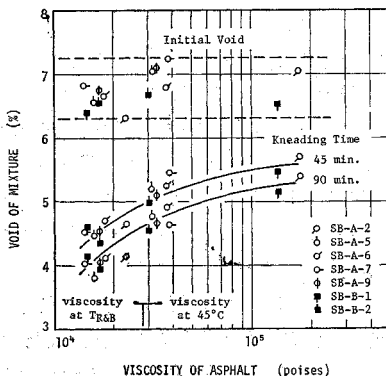


図-5 アスファルトの粘度と混合物の空隙率との関係

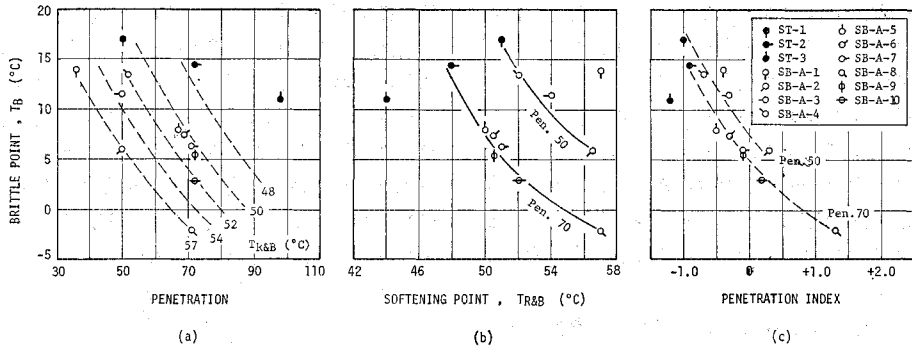


図-6 アスファルトの性状と混合物のぜい化点との関係

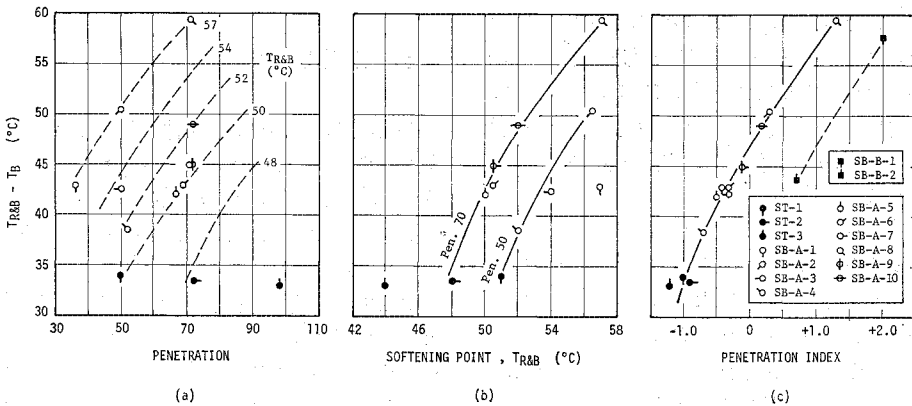


図-7 アスファルトの性状と軟化点-ぜい化点との関係

次に使用したアスファルトの軟化点 ( $T_{R\&B}$ ) を基準温度とし、それと混合物のぜい化点 ( $T_B$ ) との温度差すなわち  $T_{R\&B} - T_B$  を縦軸に、横軸に針入度、軟化点、針入度指数をそれぞれとり、それらの関係を 図-7 の (a), (b), (c) に示した。

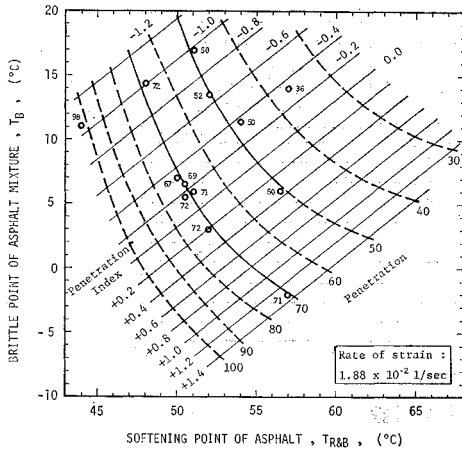
図は  $T_{R\&B} - T_B$  と針入度との間には軟化点をパラメーターとし、軟化点との間には針入度をパラメーターとした関係があることを示している。針入度指数との間には 図-7 の (c) が示すように密接な関係があり、単に針入度指数のみで  $T_{R\&B} - T_B$  が決定されるとしてよいであろう。しかしセミプロンタイプBは他のものとは異なった傾向を示しており、アスファルトの製法の差ができてきているものと考えざるを得ない。ここでは製法の差を主眼としておらず、アスファルトの性状と混合物の力学的性状の一般的な関係を求めようとするところから、セミプロンタイプBについてはここでは除外した。なおアスファルトの製法の差は混合物の破壊性状にのみ表われており、他の力学的性状にはみられない。

軟化点は前述したように工学的には等コンシステンシー温度として取り扱うことができるとし、また前述のように軟化点における混合物の変形抵抗性はほぼ同一であるとの結論を得ている。さらに混合物のぜい化点はぜい

性破壊をする上限温度である。このことから軟化点およびぜい化点はおおの“混合物の性質が同じになる温度”と考えることができる。このことから  $T_{R\&B} - T_B$  の逆数が混合物の感温性を表わすということができ、一方針入度指数はアスファルトの感温性を表わす指標であるとされていることから、 $T_{R\&B} - T_B$  と針入度指数が密接な関係にあることはうなづける。すなわち混合物の感温性は使用したアスファルトの感温性に支配されることをこれらのデータが直接示している。さらに  $T_{R\&B} - T_B$  が大ということは混合物の“フレキシブルな領域”が広いことをも意味している。

以上述べたように混合物のぜい化点は針入度、軟化点、針入度指数などと複雑に関係しあっている。そこで使用したアスファルトの針入度、軟化点と混合物のぜい化点との関係を明らかにするために、 $T_{R\&B} - T_B$  と針入度指数の関係 (図-7 の (c)) および  $T_B$  と軟化点との関係 (図-6 の (b)) から、ぜい化点を求めるためのノモグラムを描き 図-8 として示した。

図において横軸は軟化点、縦軸はぜい化点を示し、細い実線で示した直線群は針入度指数を、また太い実線 (図-6 の (b) と同一であり実測値を示す) および破線 (図-7 の (c) からの計算値) 群は針入度を示し、実測



Note: When the rate of strain takes a figure down one place, the brittle point of asphalt mixture drops 6°C or so.

図-8 混合物のぜい化点を求めるノモグラム

値は白マルで示してある。ぜい化点は2つの線群の交点として示されている。したがって針入度および軟化点から混合物のぜい化点を知ることができる。また図をみると、混合物のぜい化点をさげるには針入度が一定のとき軟化点を高く、軟化点が一定のとき針入度を大きく、針入度指数が一定のとき針入度を大きくもしくは軟化点を低くすればよいことがわかる。

一方、このノモグラム(図-8)はひずみ速度  $1.88 \times 10^{-2}$  (1/sec) に対して作成したものであることから、厳密に言えばひずみ速度が変化した場合には適用できない。しかしひずみ速度が変化してもこの図はまったく形を変えず上下にずれるのみであり、ひずみ速度1オーダーの変化は温度にして  $5 \sim 6^\circ\text{C}$  の変化であり<sup>9)</sup>、また対象をアスファルトコンクリートと限定すれば骨材体積率( $C_p$ )は0.85前後であることとアスファルト量のとらうる範囲も  $\pm 1\%$  程度であることから、この程度の変化はぜい化点に  $1 \sim 2^\circ\text{C}$  の移動をもたらすのみで、ほとんど無視することができる。これらを考慮するならば、ひずみ速度、配合の変化したアスファルトコンクリートに広範囲にこの図を適用することが可能となる。また本ノモグラムは針入度  $36 \sim 98$ 、軟化点  $44 \sim 57^\circ\text{C}$ 、針入度指数  $-1.2 \sim +1.3$  の範囲内で成立する。したがって、舗装用アスファルト混合物に利用されるストレートアスファルト、セミブローンアスファルト(特殊加工品を除く)を網らしていると考えてもよいであろう。

### 7. 疲労性状

アスファルト舗装の疲労問題は、道路舗装における載荷条件、環境条件などを正確に把握しがたいことなどの理由によりきわめて困難な課題とされている。しかし混

合物に生ずるひずみ(または応力)の大きさによりその疲労抵抗性は支配され、またわずかのひずみ(応力)の変化での疲労破壊回数は大きく変化することは知られている。

ここでは混合物に繰り返し曲げを作用させて疲労破壊を生ぜしめ、使用したアスファルトのコンシステンシーの差異が繰り返し載荷過程における力学的性状の変化および破壊にいたるまでの載荷回数(以下単に破壊回数という)に及ぼす影響を与えるかを検討することを目的としている。

実験は温度  $10^\circ\text{C}$ 、周波数  $10\text{ Hz}$ 、ひずみ  $6 \times 10^{-4}$  で行い、使用した装置、供試体の作成法ならびに試験法などについては前報<sup>9)</sup>と同じであることから、ここではその詳細は省略する。また疲労破壊なるものはばらつく現象であるとされていることから、おのおのの混合物について12本の供試体を用いた。なお5種のアスファルト(SB-A-2, 8, 10, SB-B-1, 2)については破壊回数が大となることから与えるひずみを  $(6 \sim 10) \times 10^{-4}$  と変化させて実験を行った。

ひずみ制御方式の繰り返し載荷試験を行ったとき混合物の複素弾性率は載荷回数の増大にともない減少し、ある載荷回数近辺に至って急激な低下を示すことをすでに明らかにし、また、繰り返し載荷過程における力学的性状の変化を複素弾性率の低下率で論ずることができることも指摘した<sup>9)</sup>。ここでは前述した実験条件下での混合物の複素弾性率の低下率を求め、それと使用したアスファルトの針入度、軟化点、針入度指数との関係を検討した。複素弾性率の低下率と針入度もしくは軟化点との間には一義的な関係は存在せず、針入度指数との間にはかなりの変動を示しながらも針入度指数が大となれば複素弾性率の低下率も大となる傾向を見出すことができた。

図-9は図中に示した条件下における各混合物の破壊回数を示している。図が示しているように破壊回数は  $10^{0.5}$  オーダー程度の変動があることから、図には  $95\%$  信頼区間および平均値を示してある。なお5種のアスファルトについてはひずみ-破壊回数関係からひずみ  $6 \times 10^{-4}$  におけるそれを示してある。また使用したアスファルト間に破壊回数の差があるか否かを検討するために、有意差の有無の検定を行い、その結果を図中の太い実線で示してある。すなわち ST-1, 2, 3 の間、SB-A-1, 4 の間、SB-A-3, 9 の間、SB-A-6, 7, 9 の間には有意差がないとの結論を得た。

破壊回数の平均値とアスファルトの針入度、軟化点、針入度指数との関係を図-10の(a), (b), (c)に示した。針入度ならびに軟化点と破壊回数との間には、各グループごとの点が少ないことから、明確な関係を見出しがたい。図-10の(c)は針入度、軟化点に関係なく

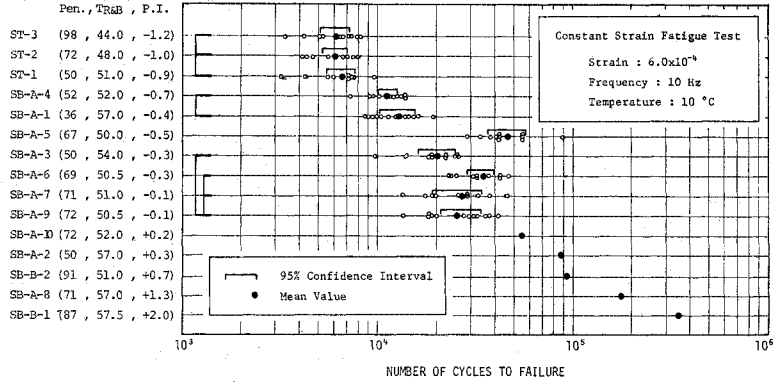


図-9 混合物の疲労破壊回数

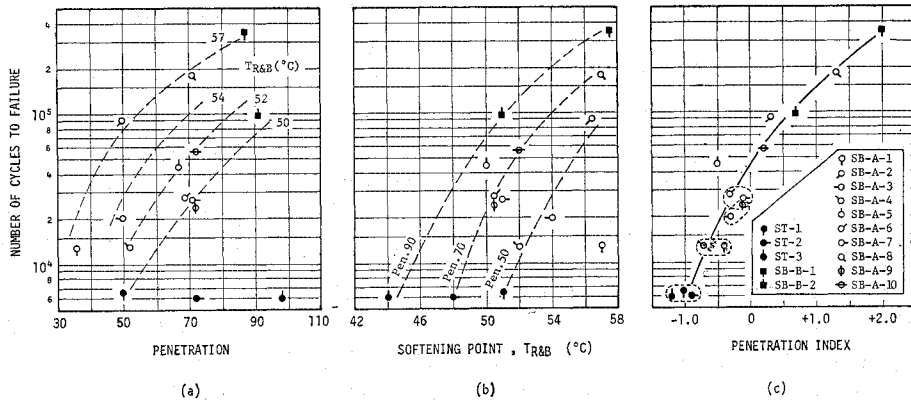


図-10 アスファルトの性状と混合物の破壊回数との関係

針入度指数が大となるほど破壊回数が大となる傾向を示している。この関係が示す意味はきわめて複雑であり、十分に解析することは困難である。ここで得られた関係をもとにして逆に 図-10 の (a), (b) について考察してみるならば、破壊回数と針入度の間には軟化点をパラメーターとし、軟化点との間には針入度をパラメーターとした関係が存在するらしくみられる。針入度が同一の場合には軟化点が高いものほど疲労抵抗性が大きく、これは Cooper ら<sup>10)</sup>の結果とよい対応を示している。この関係は軟化点 44~57.5°C、針入度 36~98 という広範囲にわたっていい得るものである。軟化点がある場合には針入度の大きなものが疲労抵抗性が大きくであることを図は示している。これらを総合してみるならば、針入度、軟化点、針入度指数の疲労抵抗性への寄与はかなり明確なものであるとしてもよいであろう。

以上のことから、温度 10°C、周波数 10 Hz、ひずみ  $6 \times 10^{-4}$  という条件下における混合物の繰り返し載荷に伴う力学的性状の変化および破壊に関しては、使用したアスファルトの針入度指数がかなり寄与しているといえる。すなわち、針入度指数 -1.0 程度のストレートアスファルトは繰り返し載荷をうけたとき、その過程におけ

る力学的性状の変化は少なくとも、ある繰り返し載荷回数にいたって急激に破壊し、破壊回数も小さいといえる。一方針入度指数の大なるブローン系の力学的性状の変化は針入度指数の小なものに比し大きいにもかかわらず、破壊回数は大となることが明らかにされた。

### 8. 変形係数

舗装構造を構成している各層の変形係数は上下層の変形係数比を介して、荷重を分散させる能力、すなわち路床面における応力の軽減と密接に関係している。ここではアスファルトのコンシステンシーが混合物の弾性係数に及ぼす影響を与えるかを検討し、アスファルトの性状の差が構造設計上どのような意味をもつかについて論じた。

#### (1) 比較的低温における弾性係数 (-15~20°C)

前報<sup>11)</sup>において述べたとまったく同様の方法で、各混合物の複素弾性率のマスターカーブを得た。車両走行時におけるアスファルト層の変形係数が使用したアスファルトの性状によって異なる値を示すかどうかを検討する



表-3 車両走行時(0.016秒)における  
混合物の複素弾性率 ( $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ )

	Temperature (°C)							
	20	15	10	5	0	-5	-10	-15
ST-1	1.9	3.8	5.9	7.2	8.7	9.1	10.7	11.2
ST-2	2.6	4.2	6.1	7.5	8.2	9.4	11.0	11.9
ST-3	2.2	4.3	5.9	7.3	8.0	9.5	10.6	10.8
SB-A-1	2.8	4.5	6.5	7.8	8.8	9.6	10.7	10.8
SB-A-2	2.6	4.3	5.8	6.2	8.1	9.0	10.1	11.1
SB-A-3	1.9	3.8	5.9	7.4	8.3	9.7	10.3	10.4
SB-A-4	2.8	3.7	5.3	7.6	8.3	9.8	11.0	12.4
SB-A-5	2.3	4.4	5.1	6.9	7.9	9.1	9.9	10.5
SB-A-6	2.6	4.7	6.0	7.1	8.8	9.5	10.9	11.2
SB-A-7	2.0	3.9	5.8	6.9	8.2	8.9	9.7	10.3
SB-A-8	2.8	3.7	5.8	7.0	8.1	8.8	9.1	9.9
SB-A-9	2.2	4.0	6.0	7.5	8.6	9.6	9.9	10.5
SB-A-10	1.9	3.2	6.2	7.1	8.9	9.1	9.5	9.8
SB-B-1	2.1	3.9	5.9	6.9	8.2	8.9	9.5	9.9
SB-B-2	1.9	4.0	5.4	7.3	8.3	9.2	9.8	10.1

ために、温度  $-15 \sim 20^\circ\text{C}$ 、載荷時間  $1.6 \times 10^{-2}$  秒(車両走行時の載荷時間はおおよそ  $10^{-2}$  秒のオーダーである<sup>12)</sup>)における各混合物の複素弾性率を表-3に示した。

表をみると、この領域( $-15 \sim 20^\circ\text{C}$ )における混合物の複素弾性率は、アスファルトの針入度が36~91、軟化点が44~57.5°C、針入度指数が-1.2~2.0と変化しても、大きな差異をみせない。すなわち車両走行時におけるアスファルト層の荷重分散性能は温度  $-15 \sim 20^\circ\text{C}$  においてアスファルトのコンシステンシーに大きな影響をうけないとしてもよいであろう。これは先に述べた疲労抵抗性とあわせて考えると、かなり重要な結論というべきであろう。

(2) 高温における変形係数(軟化点温度)

高温領域における混合物の変形係数について検討するために、自重による曲げクリープ試験(供試体寸法  $3.5 \times 3.5 \times 17 \text{ cm}$ 、スパン  $15 \text{ cm}$ )から得られたクリープコンプライアンスを用いた。

使用したアスファルトの軟化点温度における混合物のクリープコンプライアンスは時間  $1 \times 10^3$  秒において、 $(1.5 \sim 2.6) \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 、平均値  $2.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{kg}$  とほぼ等値を示した。

このことから、軟化点温度における混合物の変形係数(クリープコンプライアンスの逆数)は時間  $1 \times 10^3$  秒において  $5 \text{ kg/cm}^2$  とほぼ等値であるとしてことができ、温度  $-15 \sim 20^\circ\text{C}$  における車両走行時の変形係数はアスファルトのコンシステンシーにあまり影響されないこととあわせて考えるならば、アスファルトのコンシステンシーはおおよそ  $20^\circ\text{C}$  前後を境にしてそれより低いときはアスファルト層の荷重分散性能に大きな影響をおよぼすことなく、それより高い温度において温度が高くなれ

ばなるほど無視できない影響を与えると考えられる必要がある。

9. 結 論

本研究では、アスファルトの性状が混合物の力学的性状に及ぼす影響を与えるかを検討することを目的とし、アスファルトのコンシステンシーを絶対粘度、針入度、軟化点、針入度指数などで表現し、混合物の性状を変形抵抗性、破壊性状、疲労性状、変形係数ならびに混合物の施工性など総合的にとらえ、これら相互に及ぼす関係があるかを論じた。

アスファルト舗装におけるアスファルト混合物が具備すべき力学的性状の望ましい方向を与えるためには室内試験による本研究の範囲内で考えてみるならば、軟化点が高くなるべく針入度の大きなアスファルトを用いた方がよい。すなわち変形抵抗性を増大させるためには粘度が大なもの、工学的には軟化点が高いアスファルトを用いるのが好ましく、軟化点が決まればなるべく針入度の大きいアスファルトを用いれば、ひび割れしにくくぜい化点(軟化点)が低い、耐久性の高い(疲労破壊回数が大きい)舗装となるであろう。これらのことから軟化点を高くするために針入度を小さく、もしくは針入度をそのまま軟化点を高くする考え方ではなく、軟化点を高くするとともに針入度も大きいアスファルトが好ましいものであると考える必要があろう。

しかし室内における実験研究では軟化点が高くかつ針入度が大きい(このことは針入度指数が大となる)アスファルトほど混合物の力学的性状は望ましいものとなり、本研究の範囲内では針入度指数の上限値を見出すことはできない。針入度指数の大きさの上限値を決める要素としては、次の2つをあげることができる。

(1) 締め固められる以前のルーズな状態における混合物の性質(流動性)

これは混合から転圧という施工性の問題であり、具体的なものとして、

- a. アスファルトの溶解
  - b. 混合温度上昇にともなう材料の劣化および混合の均一性
  - c. 敷き広げ時におけるひきずり
  - d. 転圧時におけるヘヤークラックの発生
  - e. 締め固め密度
- などをあげることができる。

(2) 混合物の応力緩和性状

この応力緩和性状は温度応力ならびに変形に関する問題であり、具体的なものとして、

- a. 施工ジョイント部でのクラックの発生
- b. 温度応力にもとづくクラックの発生などをあげることができる。

この両者はともに当然針入度指数が小さいほど好ましい方向を示すものであるが、これら自体アスファルト舗装において重要な課題であることから、現場での実際規模の実験が必要と思われるが、針入度指数の上限値の設定についてはほとんど研究されていない。かつて筆者らが行った針入度指数の上限値設定に関する研究<sup>13)</sup>を参考として付録に示しておくことにする。

本成果は従来のアスファルトの製造に用いられてきた原料油、製法の範囲内のアスファルトのものであり、原料油および製法が極端に変化する場合等においては、なおいっそうの検討を必要とする。

本研究は北海道大学工学部における森吉昭博、上島社の両氏と筆者らの共同研究によるものであり、筆者らがつりまとめにあたった。試料はすべて丸善石油株式会社中央研究所に提供していただいたものを使用し、試料作成にあたり、ご尽力いただいた関根幸生、山口尚己の両氏に対し厚く感謝の意を表するものである。

### 付 録

筆者らは北海道において高針入度指数のアスファルト(P.I. +0.8~+4.4)の現場での実用性状実験を行い、実用に伴う諸種の問題点について検討を試みた。使用したアスファルトは本研究で取り上げたセミプロンタイプBと同種のものであり、その針入度は100/120に統一し、軟化点を変化させたものであり、付表に示すような結論を得た。

付表 実用性状の評価

No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
針 入 度	118	109	122	120
軟 化 点	64.0	52.0	47.5	51.0
フラスゼい化点 (°C)	-33	-25	-22	-25
P.I.	+ 4.4	+ 1.6	+ 0.8	+ 1.7
評 価	①アスファルトの溶解性不良 ②転圧時にへアクラックの発生あり	①施工ジョイントの接着不良 ②ジョイント・クラック発生	舗装の変形は他に比し若干大	特に問題点見られず

表に示された結果を整理要約してみると、およそ次のとおりとなる。

- a) 軟化点が低いもの (No. 3) では夏季舗装の変形

が他に比し若干大である。

- b) 軟化点が高く針入度の小さいもの (No. 2) では秋から初冬にかけて施工ジョイントにき裂が発生しやすい。
- c) 針入度指数の極端に高いもの (No. 1) はアスファルトの溶解、混合物の転圧など施工に難点がみられる。

これらのことから、トラブルの生じない上限はおよそ+1.7程度とみられる。しかし針入度指数の上限値の設定については、さらに多くの実用性状の観察ならびに室内における基礎的研究の集積により、検討する必要があるものと思われる。

### 参 考 文 献

- 1) 菅原照雄：アスファルト混合物の力学的性状について，土木学会論文報告集，第207号，1972.
- 2) 中島昭雄，間山正一，北郷新平：舗装用アスファルトの温度依存性とせん断速度依存性について，土木学会論文報告集，第208号，1972.
- 3) Proposed Method of Test for Viscosity of Asphalt Cements with Falling Plunger Viscometer, ASTM, Part 11, 1967.
- 4) 小野修央，笠原 篤，菅原照雄：アスファルトの粘度と混合物の変形抵抗性，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，第5部，1976.
- 5) 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力学的性状の関係について，石油学会誌，第15巻，第11号，1972.
- 6) 森吉昭博，上島 社，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，1973.
- 7) 上島 社，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，1974.
- 8) 菅原照雄，上島 社，森吉昭博：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，土木学会論文報告集，第234号，1975.
- 9) 笠原 篤，菅原照雄：繰り返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について，土木学会論文報告集，第235号，1975.
- 10) Cooper, K.E. and P.S. Pell : The Effect of Mix Variables on the Fatigue Strength of Bituminous Materials, TRRL Laboratory Report 633, 1974.
- 11) 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，1973.
- 12) 笠原 篤，岡川秀幸，菅原照雄：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への利用，土木学会論文報告集，第254号，1976.
- 13) 菅原照雄，中島昭雄，笠原 篤：キャタリティック・セミプロン・アスファルトおよびそのアスファルト混合物の力学的性状，北海道大学工学部研究報告，第68号1973.

(1977.4.7・受付)