HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	キャタリティック・セミブローン・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
Author(s)	菅原, 照雄; Sugawara, Teruo; 中島, 昭雄 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 68(2), 293-303
Issue Date	1973-09-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41156
Type	departmental bulletin paper
File Information	68(2)_293-304.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

キャタリティック・セミブローン・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

菅原照雄* 中島昭雄* 笠原 篤*

(昭和48年3月22日受理)

Mechanical Properties of Catalytic Semi-Blown Asphalt and its Mixture

Teruo SUGAWARA Akio NAKAJIMA Atsushi KASAHARA

Abstract

This paper describes the test results concerning the mechanical properties of catalytic semi-blown asphalts and their paving mixtures.

Many attempts have been made for the improvement of bituminous paving mixtures. Along this line the usage of catalytic semi-blown asphalt has been regarded as one of the most effective methods for the improvement of resistance to deformation and the low temperature characteristics of bituminous mixtures.

In this investigation, the physical properties of asphalts were examined by means of penetration, softening point, Fraass breaking point and the others, while the penetration index as an index of the rheological property of asphalt was calculated. Considerable effort was made on the viscosity characteristics over a wide range of temperature from 5° to 200°C and shear rates. A rotating coaxial cylinder viscometer and a parallel plate micro-viscometer were utilized and the viscosity was measured as a function of temperature and shear rate. As a result, a rheology diagram, the viscosity temperature relation, dependency of viscosity on shear rate and degree of complex flow were obtained for 5 types of asphalt.

In the present study on bituminous mixtures, a simulated wheel tracking test was carried out to evaluate the resistance to deformation. A considerable improvement of the high temperature properties of mixtures were obtained by the usage of catalytic semi-blown asphalt.

In a beam flexure test, mode of fracture, strain at rupture versus temperature and flexural strength versus temperature were observed. The peak point of flexural strength versus temperature was designated "brittle point" by the author. On the lower temperature side from "brittle point", the mixture showed a brittle fracture, and on the higher temperature from the peak, it showed a ductile fracture. This brittle point moves so the lower or higher temperature side depending on a variety of variables. As a result, most of the mixtures showed an equal brittle point except for one asphalt, regardless of the variation of the penetration or consistency.

* 土木工学科 交通材料学講座 Department of Civil Engineering

One of the objectives of the present work was to obtain the detailed effects of the binder property. In this study, the softening point was adopted as the standard temperature and discussions were based on the assumption that the penetration of asphalt can be neglected when the difference in temperature from the softening point is adopted as a parameter. Based on the above, no penetration difference except for the rheological index, P.I., is to be considered. From the test results, the strength vs. temperature, strain at rupture vs. temperature curves with high P.I. catalytic semi-blown asphalt is further from the softening point than low P.I. straight asphalt, and it is situated on the low temperature side. This fact indicates, provided that stability or resistance to deformation at high temperature is constant, the brittle point of a binder with high P.I. tends to deviate to the low temperature side and then the visco-elastic zone extends to where the brittle zone becomes narrower. From the results of this investigation, while it may be said that catalytic semi-blown asphalts with high P.I. have a wide favorable region, the characteristics of the maximum value of P.I. should also be studied from a viewpoint of other properties such as workability, stress relaxation property, adhesion to aggregate, thermal properties etcetera.

Finally, a performance study on an actual highway was carried out, and the maximum value of 1.7 of P.I. for 100/120 grade asphalt was obtained.

1. 概　　説

本研究は原料油にリン系の触媒を添加してブローイングを行なったいわゆるキャタリテイック・セミブローン・アスファルトならびにそれをバインダーとして用いたアスファルト混合物の力学的性状に関する実験研究の成果について述べたものである。

一般にアスファルト舗装には，高温における流動に対する抵抗と同時に，低温でのフレキシビリチーが要求される。これらはアスファルトの特性を考えるとき互に相反する要求であり，この両者を両立させることは困難であり，とくに寒冷地，夏冬の温度差の大きい場合に大きな研究課題とされている。この対策として考えられる方法は，

(1) 材料配合の面からする改質

(2) バインダーとしてのアスファルトの改質

の２つである。

前者については長年月にわたる多くの試みにもかかわらず，実際には満足すべき成果は得られておらず，大きな期待をかけることはむづかしい。後者についても数多くの研究例がみられるが，未だ結論は得られていない。

本研究は，高低両温度領域での改質を目指したキャタリテイック・セミブローン・アスファルト（以下C.B.アスファルトと呼ぶ）を通常用いられるストレートアスファルト（以下St.アスファルトと呼ぶ）と対比させつつ，およそ次に述べる事項につき検討を進めたものである。

a. C.B.アスファルトの一般的な性状

b. 主として粘度からみたレオロジー性状

c. アスファルト混合物の高温における安定性

d. アスファルト混合物の曲げ強さ，破壊ひずみ

e. 実用性状の評価

2. C.B. アスファルトの性状

2.1 C.B. アスファルトの一般的性状

C.B. アスファルトとして，針入度 48, 61, 81 の 3 つを選び，これと対比させる目的から St. アスファルトとして針入度 50, 85 の 2 種を選んだ。舗装用アスファルトとしての一般的物理性状は表-1 に示す通りである。表に示されるように，C.B. アスファルトは St. アスファルトに比し，高い軟化点を有し，従って高い針入度指数 (P.I.) を示している。

表—1　アスファルトの一般性状

性状＼アスファルト	C.B-48.	C.B.-61	C.B.-80	St.-50	St.-85
針入度 25°C, 100 gr, 5sec.	48	61	81	54	85
軟化点 (°C)	69.0	60.0	52.3	56.8	46.8
針入度指数 (P.I.)	+2.6	+1.6	+0.7	+0.2	−0.5
フラース脆化点 (°C)	−22	−21	−20	−21	−21

註) C.B. はキャタリティック・セミブローンを指す。
St. はストレートアスファルトを指す。

C.B. アスファルトは，内部の化学構造，コロイド構造において St. アスファルトと異なり，独特のミセル構造をもつと云われるが，これらの一般的な性状からそれを知ることはほとんど不可能である。

2.2 粘度について

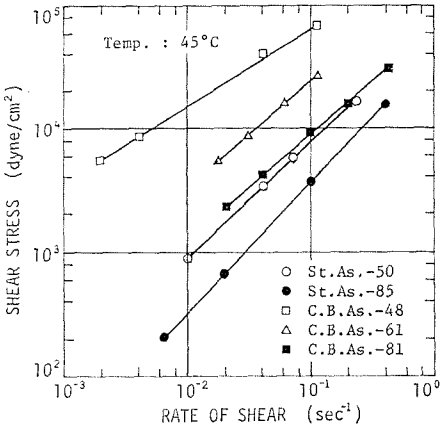
舗装用アスファルトにおいてその粘度が問題とされるのは，混合物の製造時における骨材，フィラーとの混合性，舗設時における締め固め，供用時における変形抵抗性をそれぞれ支配することにもとづいている。本研究においては，混合性から供用性までを対象として，5°C から 200°C に至る比較的広い温度幅にわたって絶対粘度の測定を行なった。試験装置としては，5～55°C については，平行平板式のマイクロビスコメータ (Microviscometer) を用い，40～200°C については 2 重円筒回転型のレオメータ (Rheometer) を用いた。両者の諸元は表-2 に示す通りである。これら 2 種の粘度計の併用によって得られるせん断速度範囲は，ほぼ連続して 1×10^{-4}～2.9×10^{2} sec^{-1} となり，温度範囲として 5～200°C をカバーすることが出来る。アスファルトの軟化点は $(1.0\sim1.5)\times10^{4}$ ポアズ程度[1] であり，軟化点近傍の性状を両機種から求めることが出来る。

表—2　使用粘度計の諸元

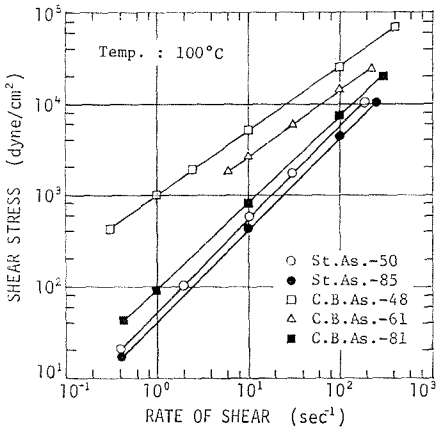
	二重円筒回転型 レオメータ	平行平板型 マイクロビスコメータ
せん断速度 (sec^{-1})	$1.5\times10^{-1}\sim2.9\times10^{2}$	$1.0\times10^{-4}\sim1.0\times10^{-1}$
粘度 (ポアズ)	$3.0\times10^{-1}\sim4.0\times10^{5}$	$1.0\times10^{3}\sim1.0\times109$
温度 (°C)	40～200	5～55

(1) レオロジーダイヤグラム

C.B. アスファルトの示す P.I. が高いことから当然それは純粘性体として取扱うことは出来ない。従って各アスファルトについて各温度についてレオロジーダイヤグラムを描き，これから仕事量一定点として 10^3 erg/sec・cm^3 点の粘度を求めた。ここではその一例として 45°C と 100°C における各アスファルトのレオロジーダイヤグラムを図-1 に示した。図中，アスファルトを示す記号に付した数字は 25°C における針入度を示している。ここに示された直線の勾配はアスファルトごとに異なっており，同一せん断速度においても，アスファルトごとに，かなり異なったせん断応力を示すことから，C.B. アスファルトの特質をよく知ることが出来る。



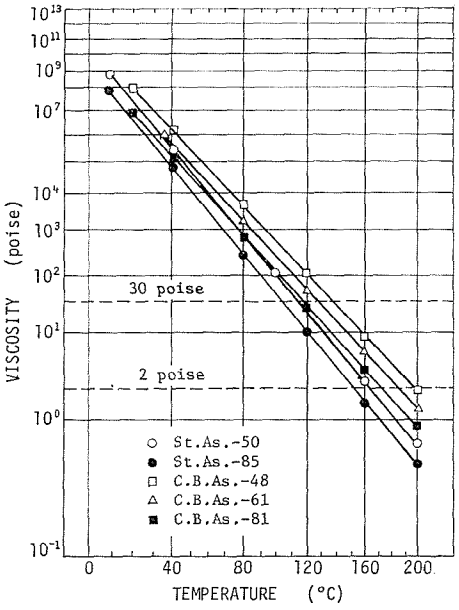
図—1・a 45°C におけるレオロジーダイヤグラム



図—1・b 100°C におけるレロオジーダイヤグラム

(2) 粘度—温度曲線

レオロジーダイヤグラムから得られる粘度を，log. log. 粘度-log 温度として示したものが図-2 である。55°C 以下についてはマイクロビスコメータによって，またそれ以上についてはレオメータによって得られたものであるが，その境界において非常によい一致を示している。この粘度—温度勾配は，P.I. に示される順に規則的に変化し，温度の低い方で集束するかに見られる。これらの傾向はほとんどすべてのアスファルトにみられるものとほぼ同一であり，粘度に見る限りC.B. アスファルトは特異なものとはなっていない。しかし，C.B. アスファルトにおける勾配は明らかに緩であり，感温性の小さいことが示されている。



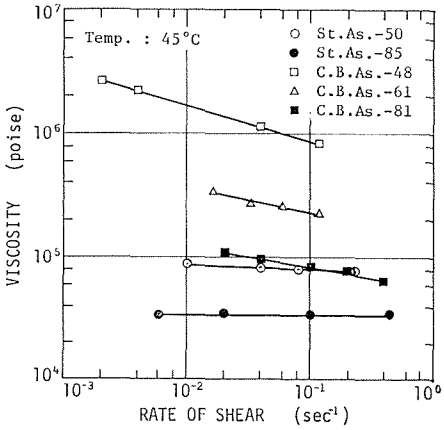
図—2 粘度—温度曲線

図中には混合最適粘度として 2 ポアズ，輾圧最適粘度として 30 ポアズを仮定して併せ示してある。これは，利用に際し施工性との関連において重要な意味をもっている。これによ

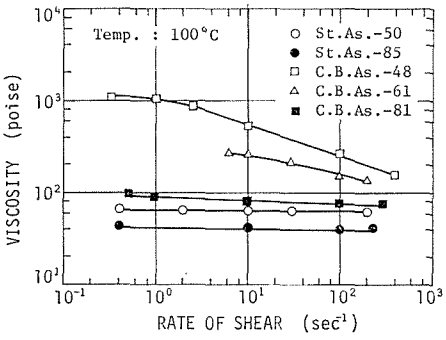
れば各アスファルトの等粘度温度はかなりの幅で変化していることが知られる。

(3) せん断速度依存性

材料が非ニュートン挙動を示す場合当然見かけの粘度はせん断速度に依存して変化し，その程度が材料の特性を表現する。舗装用アスファルト混合物において，骨材はアスファルトに被覆され，混合物の変形は当然アスファルト膜のずれをもたらしている。従って，アスファルト混合物の変形速度の差はアスファルト膜のずれひずみ速度の差として考えることが出来る。ずれに対する抵抗性は粘度にこれを置きかえて考えることが出来，混合物の力学的性状のひずみ速度依存性と密接な関係をもっている。各アスファルトのせん断速度とみかけの粘度との関係を求めた結果を図-3・a，図-3・bに示す。図-3・aは45°Cにおけるものであり，図-3・bは100°Cにおけるものである。これによれば，せん断速度とみかけの粘度は直線関係にあり，その勾配は45°Cにおいて大であり，100°Cにおいて小である。45°Cにおいて，その勾配は，St.アスファルトではほぼ同一であるが，C.B.アスファルトについては針入度の小さいものほど勾配が大になっている。これはP.I.に示されるものとほぼ同一である。



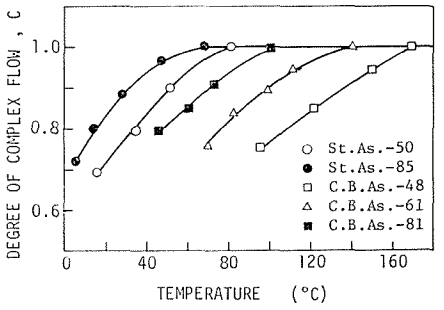
図—3・a　45°Cにおける粘度のせん断速度依存性



図—3・b　100°Cにおける粘度のせん断速度依存性

(4) 複合流動度

各種のアスファルトについて複合流動度[2]を求めた結果を図-4に示す。ここではせん断速度$5\times10^{-2}\,sec^{-1}$における数値を示している。複合流動度"C"が1から離れる温度が，ニュートン粘性から非ニュートン粘性へと移行する温度であり，St.アスファルトでは80°C以下にあり，C.B.アスファルトでは100°C以上にある。



図—4　複合流動度と温度との関係

舗装の実用性状を考えるとき，供用時においては出来るかぎり弾性的な性質を示すことが変形抵抗の増大に有用であることから考えればC.B.アスファルトは好ましい性質をもつと評価することが出来よう。一方C.B.アスファルトは舗設時の温度(30ポアズと想定)においても非ニュートン粘性を示し，通常のアスファルトとはかなりことなった施工方式をとることが必要と示唆される。

3. アスファルト混合物の性状

2.に述べたと同じアスファルトを用い，アスファルトコンクリートとロールドアスファルトの両方の混合物について，その力学的な性状を求めた。

3.1　実験に用いた材料ならびに試験法

(1)　混合物の配合

アスファルト混合物として，アスファルトコンクリートとロールドアスファルトを選んだ。前者はアメリカ型の混合物であり，後者はイギリス型として知られる。アスファルトコンクリートはその機械的安定度を主としてその内部摩擦に存在し，ロールドアスファルトはバインダーの粘度に依存すると云われている。用いるバインダーのコンシステンシーは前者において針入度 80/100 級が多く，後者において 40/60 級が多い。本研究では，3 種の C.B. アスファルトを両方の混合物に，St. アスファルトは針入度 50 をロールドアスファルトに，また針入度 85 をアスファルトコンクリートに用いて対比させている。

これらの混合物の粒度組成，アスファルト量は表-3 に示す通りである。粗骨材は全て砕石とし，2.5 mm 以下の砂分は海砂を主とし，0.074 mm 以下の粒分は石灰粉末である。

表—3　アスファルト混合物の配合

ふるい目の開き (mm)	骨材通過百分率	
	アスファルトコンクリート	ロールドアスファルト
20	100	100
15	89	89
10	76	62
7	67	46
5	59	46
2.5	47	46
1.2	38	46
0.6	27	46
0.3	14	35
0.15	9	11
0.074	7.0	8.9
アスファルト量 (%)	5.76	7.20

(2)　実験の方法

高温での性状を求めるのに 2 つの方法を選んだ。1 つは通常用いられるマーシャル試験であり，もう 1 つはホイールトラッキング試験である。前者は 60°C で後者は 45°C で実験を行なった。これらの試験機ならびに試験方法は参考文献 3) に詳細に示されているのでここでは省略する。

(3)　マーシャル安定度

マーシャル安定度はアスファルト混合物のプラスチックフローに対する抵抗性を求めるものであり，広く世界各国で利用されている比較的簡便な試験法であるが，混合物の複雑な粘弾性状を求めるには必ずしも適切とは云い難い。本研究では混合物の安定性のおおよそを把握する目的と実用性との相関の意味からこれを求めてみた。

表-4 は，アスファルトコンクリートとロールドアスファルトについての安定度，フロー値ならびに安定度/フロー値，60°C 粘度を示したものである。これによれば，C.B. アスファルトを使用した混合物は何れの場合にも St. アスファルトを利用したものに比し大きな安定度を示してい

表—4　マーシャル安定度

混合物	アスファルトのタイプ	安定度 (kg)	フロー値 (1/100mm)	安定度/フロー	60°C 粘度 (ポアズ)
アスファルトコンクリート	C.B.-42	1,140	54	21.1	5.5×10^4
	C.B.-61	1,050	59	17.8	2.5×10^4
	C.B.-81	1,050	44	23.9	8.0×10^3
	St. -85	860	44	19.5	4.0×10^3
ロールドアスファルト	C.B.-48	1,480	46	32.2	5.5×10^4
	C.B.-61	1,320	52	25.4	2.5×10^4
	C.B.-81	1,040	51	20.4	8.0×10^3
	St. -50	860	48	17.9	6.5×10^3

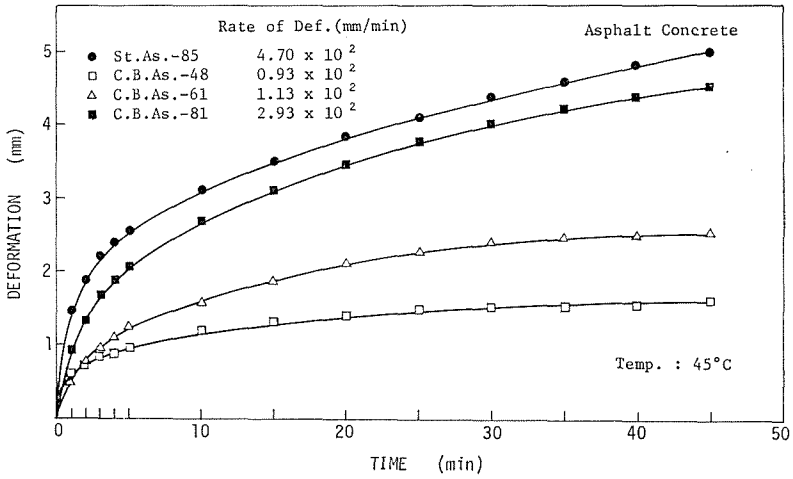
る。安定度の上昇の程度は，ロールドアスファルトにおいて大であり，アスファルトコンクリートにおいて小である。これはバインダー粘度に依存する割合が，ロールドアスファルトに於いて大きいためと考えられる。フロー値に関しては針入度が同じ場合，C.B. アスファルトと St. アスファルトにおいて差があまりみられないことは両方の混合物において共通であるが，あまり規則性はみられない。一方マーシャルステイフネスの名で呼ばれる安定度/フロー値は C.B. アスファルトにおいて大とみなしてよいようである。また C.B. アスファルトの使用によるマーシャルステイフネスの上昇はロールドアスファルトにおいて顕著とすることが出来る。

以上について実用的見地から考察するに，C.B. アスファルトの特性はロールドアスファルト型の混合物においてよく発揮され，アスファルトコンクリート型においてあまり顕著ではないと結論される。

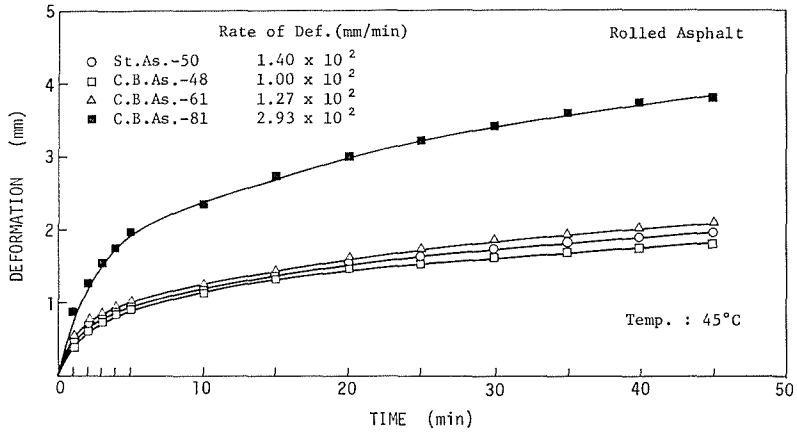
(4) ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験は車輪の繰返し走行にもとづくワダチ掘れを求める試験法であり，より実際条件に近い安定度を求めるための試験と考えることが出来る。

図-5・a, 図-5・b は，それぞれアスファルトコンクリート，ロールドアスファルトについての，



図—5・a　アスファルトコンクリートの変形—時間曲線



図—5・b　ロールドアスファルトの変形—時間曲線

変形量と，車輪走行時間 (21 往復/分) との関係を示している。この試験では初期の条件により，ワダチ掘れ深さの絶対量は若干変化するので，変形の程度は，定常的な変形を示す時間領域での単位時間当りの変形量をとるのが適切とされている。ここでは単位時間（1分）当りの変形をとり，これを変形率 (Rate of Deformation, mm/min) で表現した。

ここに示された結果を要約すればおよそ次の通りである。

a．アスファルトコンクリートにみられる各アスファルト間の差はロールドアスファルトのそれに比し比較的大である。これはマーシャル試験にみられる結果と若干異なっており，これは載荷条件の差によるものと考えられる。

b．変形率の大小は両方の混合物について，ほぼ軟化点の順にならび，軟化点の高いほど，変形率が小，すなわち安定度が大となっている。

c．同一針入度級にあっても，C.B. アスファルトの方が変形抵抗が大である。

以上の結果からすれば，主として粘度によって表現されるアスファルトの性状が，混合物の変形抵抗を支配していると見ることが出来，変形抵抗に限定して云えば高粘度アスファルトが好ましい特性をもっていると結論することが出来る。

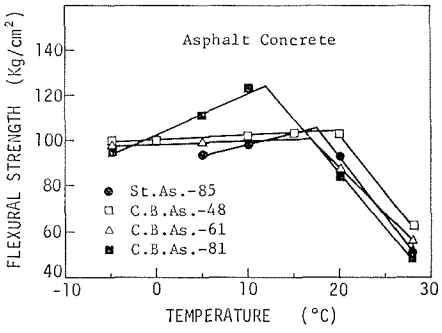
(5) 高速曲げ試験

アスファルト混合物の曲げ強さ，破壊ひずみなどを測定することによりその力学的な性質をよく知ることが出来る[4]。

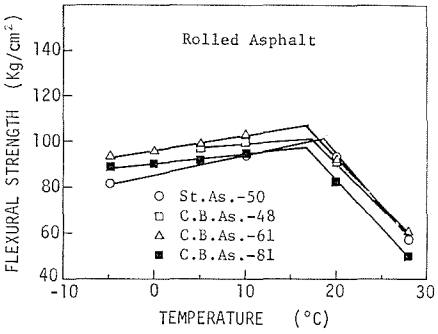
本研究においては 25×25×250 mm 供試体を用い，スパン 200 mm として中央点載荷によって試験を行ない，曲げ強さ，曲げ破壊ひずみの測定を行なった。なお本実験ではたわみ速度を一定とし，12 cm/sec すなわちひずみ速度 0.45 1/sec を選んだ。いうまでもなくひずみ速度の変化は曲げ強さ，破壊ひずみに大きな影響を与えるが各アスファルトの相対的な比較には固定したひずみ速度を用いることが出来る。

図-6・a, 図-6・b はそれぞれアスファルトコンクリート，ロールドアスファルトの曲げ強さ—温度関係を示している。これらの結果によれば，各アスファルトを用いたものすべてがピークをもつ山型の曲線をもって示されており，そのピークに示される曲げ強さの絶対値に大きな差はみられない。

アスファルトコンクリートについてみると，C.B.As.-85 のピークが 12°C にあるほかは各アスファルトとも 17～18°C 近辺に集中している。ロールドアスファルトについてはすべてのアスファルトについて 17～18°C に集中の傾向がみられる。この結果からみれば 1 つを除いてはこのピークの位置は変化しないと結論出来る。



図—6・a　アスファルトコンクリートの曲げ強さ—温度関係

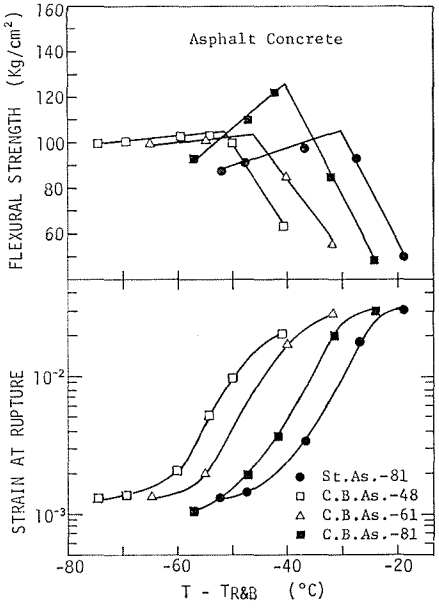


図—6・b　ロールドアスファルトの曲げ強さ—温度関係

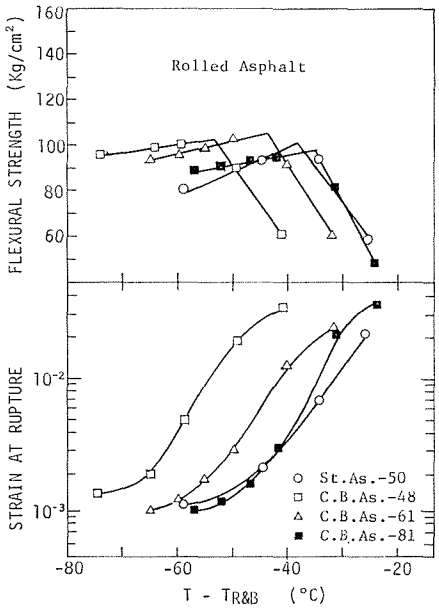
通常 St. アスファルトを用いた場合，このピークの位置は低針入度のものほど右側すなわち高温側にずれる傾向がみられる。それに反して C.B. アスファルトが低い針入度にもかかわらず，同じ位置にピークをもつことは注目すべき特性である。

このように針入度級を無視してこのピークの位置のみを議論することは，粘弾性学には適切ではない。すなわち，コンシステンシーを無視して議論を進めるためには，何らかの基準温度をとり，それからの温度差としてこのピークの位置を論ずる方がより合理的である。アスファルトにおいてこの基準温度を如何にとるべきかについては論が多い[1]。本来はこのピークは，一種の等コンシステンシー温度であり，これに対応させるためには高温側において，もう一つの等コンシステンシー温度をとるべきであると思われる。それは当然流動抵抗が同一の温度とするのが，舗装を論ずるうえでは便利である。しかし混合物において等流動抵抗温度を求めることには多大の実験上の困難が伴うものであり，これに期待することは難かしい。著者らはさきに，温度を変化させて，マーシャル試験を行ない軟化点における安定度はほぼ等しいことを明らかにした[5]。これにもとづき本研究に於いては，アスファルトセメントの軟化点を基準温度に選び，これからの温度差との関連について考察を加えた。

図-7・a および 図-7・b は，基準温度としての軟化点と試験温度との差を横軸にとり，縦軸に曲げ強さと破壊ひずみをとったものである。普通アスファルトにおける曲げ強さ—温度曲線と破壊ひずみ—温度との対応についてはすでに著者らによって詳細に論じられているが[4]，C.B. アスファルトについても完全な対応が得られたとしてもよかろう。図-7 によれば，C.B. アスファルトの曲線は何れの場合に於いても St. アスファルトから左側すなわち，軟化点からの温度差が大となる。このことは破壊ひずみの大きい領域が広いことを物語るものとみることが出来，アスファルト混合物にとっては好ましい性状と評価することが出来る。この温度差は，本研究の場合 P.I. の大きいものほど顕著と云うことが出来る。ここでは針入度が小さいものほど左側にずれると読



図—7・a　アスファルトコンクリートの曲げ強さ，破壊ひずみと T-$T_{R\&B}$ の関係



図—7・b　ロールドアスファルトの曲げ強さ，破壊ひずみと T-$T_{R\&B}$ の関係

みとられるが，基準温度からの差をとっている以上針入度は無関係であり，もっぱら P.I. の差と読みとるべき結果である。

4. その他の性質

アスファルト混合物に関しては上に述べたほかいくつかの力学的に重要な性質があるらしいことが明らかにされているが，それが具体的に如何なるものであるかは，未だ十分に解明されていない。筆者はこれらについて次の2つが極めて重要ではないかと考えている。

(a) 高温におけるルーズな状態での混合物の力学挙動

(b) 応力緩和性状

(a) は施工性に関する問題であり，所要のコンシステンシーを得るために温度の上昇が必要となり，材料の劣化をもたらすような，高粘度バインダーは好ましくない。従ってこの意味から当然粘度の上限，P.I. 値の上限の設定が必要となるがこれは単に材料学的観点からのみのアプローチでは解決が困難であり，実用試験が必須とされる。

(b) は主として温度応力，変形に関するものであり，極端に高い P.I. をもつものには亀裂が発生しやすいことが経験的に知られている。これは材料の応力緩和性状にもとづくものであり，応力緩和の程度が知られる必要がある。残念ながらこの分野の研究は未開拓に近く，現状においては実用との関連においてその限界を見出す以外に方法はない。本研究ではこれらにもとづき次に述べる現場での実用性状実験により，これらを把握しようとした。

5. 実用性状に関する研究

以上に述べた一連の室内実験の結果，その力学的な性状をかなり把握出来たが，前項に述べた理由にもとづき，室内実験では把握出来ない点も多いので，昭和42年度から北海道内の数カ所において実用に伴う諸種の問題点について検討を試みた。実用に供されるアスファルトは当時100/120級針入度のものが多かったので，この針入度級におけることなる軟化点をもつものについて検討し，表-5に示すような結果を得た。

表-5に示された結果を整理要約してみるとおよそ次の通りとなる。

(1) 軟化点の低いもの (No. 3) では舗装の変形が若干大である。

(2) 軟化点が高く，針入度の小さいもの (No. 2) では施工ジョイントに亀裂を発生しやすい。

(3) P.I. の極端に高いものは施工に難点がみられる。トラブルの生じない上限は +1.7 程度とみられる。

表—5 実用性状の評価

性状＼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
フラース脆化点 (°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転圧時にヘ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	舗装の変形若干大	特に問題点見られず

これらの実用性状の観察にもとづき，さらにP.I.の上限値の設定に関する検討が望まれる。

6. 結　論

以上室内実験ならびに実用試験の結果，C.B.アスファルトを用いたアスファルト混合物は，力学的性状において好ましいと思われるいくつかの性状を備えていることが明らかにされた。しかし，P.I.の上限値の設定など今後の検討に待つ点も少なくなく，施工性，耐久性ならびにその経済性などについて多くの検討項目が残されているとしなければならないであろう。この意味においてアスファルト混合物における，施工性にかかわる材料の力学的性状，応力緩和性状なども研究されるべきであり，より基礎的に化学構造の問題についても検討されることが望ましい。

おわりに

本研究に関し，試料アスファルトの製造に関しては丸善石油株式会社研究所の堀尾哲一郎博士に多大の御援助を戴き，また実験に関しては間山正一，神崎靖の諸君の協力を得，また実用試験に関しては北海道開発局ならびに堀尾博士に負うところが大きい。さらに当時ほぼ同じ課題で研究を進めておられた三菱石油株式会社研究部の飯島博博士には示唆に富む御教示，御協力を戴いた。ここに御協力を戴いた各位に厚く感謝の意を表するものである。

文　献

1) 笠原　篤，菅原照雄：石油学会誌，Vol. 15, 1972 (昭47), No. 11, pp. 52-55.
2) 中島昭雄，間山正一，北郷新平：土木学会論文報告集，No. 208, 1972 (昭47), pp. 99-106.
3) 菅原照雄：アスファルト，Vol. 15, 1972 (昭47), No. 85, pp. 6-12.
4) 森吉昭博，上島　壮，菅原照雄：土木学会論文報告集，No. 210, 1973 (昭48), pp. 57-64.
5) 菅原照雄：第5回日本道路会議論文集，1959 (昭34), pp. 365-367.
ほか C.B. アスファルトに関し，飯島　博，堀尾哲一郎の多くの発表がある．