

エポキシ樹脂混合物の力学性状に関する研究

MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY RESIN-AGGREGATE-MIXTURES

間山正一*・菅原照雄**

By Masakazu MAYAMA and Teruo SUGAWARA

1. 概 説

エポキシ樹脂混合物（ここでは樹脂、硬化剤、骨材とその他添加剤の混合をいう）の力学性状について土木材料としての角度からの研究例は少なく、この分野における研究および研究手法の確立が待たれているのが現状である。セメント・コンクリート、アスファルト混合物と比較してエポキシ樹脂混合物（以下単に混合物という）の大きな特徴は、エポキシ樹脂、硬化剤などの選択、配合の選択の自由度がきわめて高く、それらによって多様な力学性状が得られることにある。たとえば、アスファルトの場合、実用上変え得るアスファルト量はある骨材粒度に対して 1% 程度が限度であり、アスファルト量を大幅に変えて多様な力学性状を得ることはきわめて難しい。一方バインダーとしてのアスファルトの性状に関しても大きく性状の変化するものは得られない。これらの材料に比較して、エポキシ樹脂混合物は硬化剤の種類と量によって硬化時間および変形係数、伸び、強度などの力学性状を大幅に変化させることができ^{1),2)}、また混合物中に占めるバインダー（ここではエポキシ樹脂、硬化剤、添加剤などの混合されたものをいう）量も 10~20% と大きく変えることが可能であり、これによって力学性状を大幅に変化させることができる。

このように多様な力学特性をもつ混合物は、土木材料として多種多様な用途への利用の可能性をもっているといえよう。

筆者らは、このような特徴をもつ混合物の用途の一つとして、ここでは道路舗装材料としての利用を想定した^{3),4)}。この場合の用途として

- a) 接着剤としての利用：プライマーおよびタックコートのような下塗り塗装、あるいはシールコートの

ような上塗り塗装

- b) ニート法：まずバインダーを塗布し次いで骨材を均等に撒布し固着させる仕上げ法
c) トーラウエル法：バインダーと骨材を混合したエポキシ樹脂混合物を敷き広げて、コテまたは適当な仕上げ機械で仕上げる工法
d) セルフレベリング法：流し延べ法による舗装があるが、本研究においてはトラウエル法を想定してバインダーと骨材との混合物をとりあげた。

これらの混合物は、大きく分類して

- a) コンクリート舗装
b) アスファルト舗装
c) 鋼床版
d) 処理された路盤

などの上に舗設される場合が考えられる。現在の段階においては、その経済性の見地からほとんどの場合薄層として施工されている。それぞれの場合混合物に要求される性状は大きく変化し、実験研究に際しては、その条件が加味されていることが非常に重要であることはいうまでもない。おのおのにどのような問題があるのかについては未だ十分に明らかにされてはおらず、今後の大きな研究課題の一つになるであろう。しかし、ここではまずそれらの手がかりを得ることを目的として、基本的に把握しておくことが要求される a) 破壊性状、すなわち強度と破壊時のひずみ（伸び）、b) 温度と時間の関数として表現される変形係数、に重点をおいて論じ、いわゆる素材としての材料特性の把握を研究の主体とした。さらに好対称をなすと考えられる舗装用アスファルト混合物との力学性状の比較も試みた。

なお、エポキシ樹脂混合物なる名称は在来あまり用いられていない。たとえば、ここにあげた材料はアスファルトモルタルないしはセメントモルタルなどに対応する粒度組成をもつが、この分野ではエポキシモルタル、エポキシコンクリート等の名称でよばれることが多い。こ

* 正会員 工修 北海道工業大学講師 工学部土木工学科

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学教室

ここでは用語の混同をさけるため、骨材とバインダーの混合を総称してエポキシ樹脂混合物とした。

2. 本実験研究の概要

筆者らはアスファルト混合物の力学性状に関して、主として舗装用材料としての観点から、それらにレオロジー手法の適用を試み、材料性状を外的条件への応答として把握するべく各種の実験研究を試みてきた。本研究は、それらの手法の応用的展開を図るべくエポキシ樹脂混合物への適用を試み、それらの観点からエポキシ樹脂混合物の力学性状を明らかにしようとするものである。

本研究の目的、概要はおよそ次のとおりである。

1) この種材料性状の合理的解析はレオロジー手法の導入によって可能であると考え、その導入を試み、その適用の可否を検討する。したがって、載荷時間（もしくはひずみ速度）と温度を大幅に変化させ⁹⁾、それらと材料性状との関連を求める。

2) 通常、材料の力学性状を論じる場合、まず破壊時のひずみおよび強度が論じられる。一般に単一の大荷重によって舗装が破壊することはきわめてまれであるが、既往材料との比較の意味で温度による混合物のひずみ特性および強度の変化を解析し、測定温度の全領域にわたっていかなる温度・ひずみ曲線および温度・強度曲線を示すかを検討する。

3) バインダー含有量による混合物の力学性状の相違について検討する。これは前述したように、他の材料には見られない混合物の力学性状の多様性を明らかにし、土木材料としての応用の可能性を検討するうえで重要な点となる。

4) 力学性状について得られたすべてのデータを既往材料として使用されているアスファルト混合物の力学性状と比較し、材料としての混合物の利用の可能性について検討する。

なお、混合物のレスポンス把握の実験法として、4オーダーにわたってひずみ速度 ($7.93 \times 10^{-5} \sim 7.93 \times 10^{-2}$) を変えた定ひずみ速度試験、および動的載荷試験を行った。後者は近年、本格的な研究機器の出現とともに注目されている⁹⁾が、本研究においては実際の道路舗装における載荷時間、温度、ひずみを考慮して、周波数 0.01~20 Hz (載荷時間に換算して 15.9~0.008 秒)、温度 0~70°C、正弦的に変化するひずみ 2.3×10^{-4} および 5.5×10^{-4} の領域で実験を行った。

3. 試験装置

実験に用いた装置は、“インストロン”型万能試験機

に疲労試験および動的載荷試験装置を加えた機能をもつものである (インストロン社製 108 型 ダイナミックサイクラの第 1 号機であり、北海道工業大学に設置)。

本機の機能としては

- a. 試験法：動的-曲げ・引張圧縮・せん断 } 両振り
静的-曲げ・引張・圧縮・せん断 } 片振り
- b. 制御方式：変位・ひずみ・応力からの油圧サーボ制御方式
- c. 波形：正弦波・三角波・矩形波・ランプ入力
- d. 最大許容荷重：±5 000 kg
- e. 周波数：正弦波で 0.001~30 Hz、ランプ入力を利用した静的載荷速度は最大 8 cm/sec まで可能
- f. 最大変位振幅：±50 mm

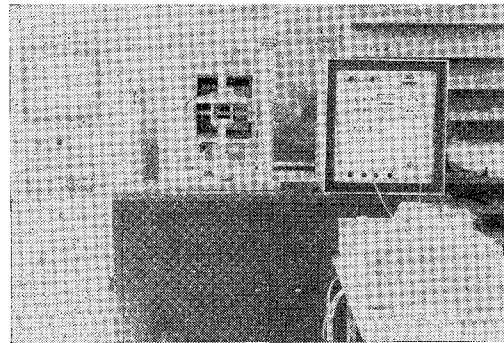


写真-1 曲げ載荷装置を装着した 108 型
ダイナミックサイクラ

写真-1 は曲げ載荷装置をつけた試験機である。なお、温度制御部としては $-60 \sim +200^{\circ}\text{C} (\pm 0.5^{\circ}\text{C})$ の空気槽と、 $-30 \sim +30^{\circ}\text{C}$ および $+20 \sim +100^{\circ}\text{C} (\pm 0.1^{\circ}\text{C})$ の 2 つの恒温水槽が付属している。

4. 試験材料

(1) バインダーおよび骨材の選択

この種の混合物のバインダー選択で最も注意を要する点は硬化剤の選択にある。筆者らは硬化剤の選定基準として、毒性の有無、大量混合の可否、施工性、早期交通開放、たわみ性の有無などに注目し、特に主剤と硬化剤の配合比によって種々の力学性状を得ることが可能な硬化剤⁹⁾としてポリアミド樹脂を選定した。なお、ベンジルアルコール、フェノール樹脂はそれぞれ施工性および硬化促進を目的として添加した。

骨材として珪砂を採用したが、最大寸法 1.2 mm はコテ仕上げを前提とした場合の最大値である。なお、粒

度分布については研究例⁹⁾を参考にした。

この意味においては、本研究はエポキシ樹脂系材料のうちごく一部の材料をとりあげたにすぎず、これのみをもってエポキシ樹脂系材料のすべてのものの性状を論ずるものではないことはいままでもない。

(2) 配合の選択

バインダーと骨材の配合比を 1:3~1:10 の範囲で変化させ、90×180 cm の鉄板上に コテ仕上げによる施工を試みたが、バインダーと骨材の分離がおこらず、また骨材の沈降などが生じない限界として 1:4 配合を、平滑な仕上り面を得られる限界として 1:8 配合をそれぞれ得た。本研究においては混合物の施工例¹⁰⁾も考慮して、配合は表-1 に示すようなものとしたが、実用的配合をこの種材料の習慣に基づき、たとえば 1:4 配合なる語を用いることにし 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 の5種類として諸種の考察を行うことにした。

(3) 供試体の作成

室温 (18~22°C) において手練り混合した材料を写

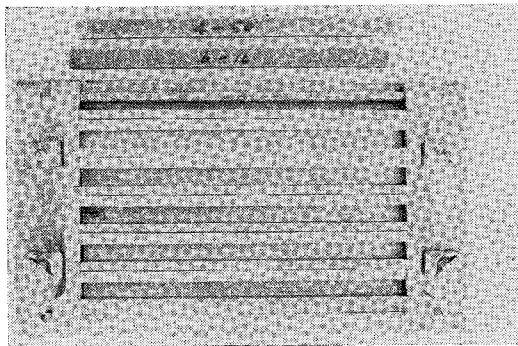


写真-2 型枠および供試体

表-2 バインダーの配合 (重量)

成分	割合	主剤	硬化剤
ビスフェノールA型エポキシ樹脂		80	
ベンジルアルコール		20	
ポリアミド樹脂			45
トリス (ジメチルアミノメチル) フェノール			5
合計		100	50
混合比 (重量)		2	1

熱変形温度 (H.D.T.) は 42°C

真-2 に示すような型枠に流し込みコテ仕上げを行う。23°C (±0.5°C) の空気槽中で 21 日間養生後、試験を行った。

なお、コテ仕上げによる供試体の空隙率はばらつきが大きく、特に骨材量が増加した場合のばらつきが大きい。本研究では物性比較の見地から空隙率の一定のものを用いることとして、空隙率はすべて 18~21% の範囲内のもののみを用いた。本実験に用いたバインダーの配合を表-2 に、骨材粒度を表-3 に示す。

表-3 骨材の粒度配合

骨材粒度 (mm)	通過重量百分率 (%)
1.2	100
0.6	55
0.3	15
0.15	0

5. 試験法および解析法

(1) 試験法

定ひずみ速度試験、動的荷重試験の両者ともスパン 30 cm、荷重点間隔 10 cm の 4 点曲げ試験法とし、温度制御された空気槽中で前者は -20~70°C、後者は 0~70°C の温度範囲で実験を行った。供試体寸法は 1.9×1.9×35 cm の角形棒状供試体とした。A.S.T.M. D 790-71¹¹⁾ は 1.9×1.9×38 cm となっている。なお、動的荷重試験においては、4~5 回の繰返し荷重を行ってその応答を得た。

(2) 解析法

動的荷重試験で入力とした 2.3×10^{-4} および 5.5×10^{-4} のオーダーのひずみは定ひずみ速度試験の結果から線形粘弾性領域と考えられる領域である。また動的応答として得られる応力も小さいことから、応力とひずみの解析は通常レオロジーの分野でとられている方法¹²⁾をとり、弾性解析とした。

供試体の中央部における最大応力 (σ_{max})、最大ひずみ (ϵ_{max}) は次式によって計算される。

$$\sigma_{max} = \frac{6Pl_1}{bh^2}$$

$$\epsilon_{max} = \frac{12hd}{3l^2 - 4l_1^2}$$

ここで

- b : 供試体の幅 (cm)
- h : 供試体の高さ (cm)
- l : スパン (cm)
- l_1 : 支点から荷重点までの距離 (cm)
- P : 荷重 (kg)
- d : 供試体中央部のたわみ (cm)

なお、破壊時のひずみは最大曲げ応力を示す点のひずみと定義する。

さらに動的載荷においては以下の値について検討する。

$$E^* = E' + iE'' = \sigma_{\max} / \epsilon_{\max}$$

$$E' = |E^*| \cos \phi$$

$$E'' = |E^*| \sin \phi$$

$$\tan \phi = E'' / E'$$

$$|\eta^*| = \sqrt{(E''/\omega)^2 + (E'/\omega)^2}$$

ここで

$|E^*|$ ：複素弾性率 (Complex Modulus), ステイフネスと同じものと考えられる

E' ：動的弾性率 (Dynamic Modulus), 複素弾性率の実数部

E'' ：損失弾性率 (Loss Modulus), 複素弾性率の虚数部

$\tan \phi$ ：損失正接 (Loss Tangent), 物体の粘性的要素の大きさを示す

$|\eta^*|$ ：複素の粘性率 (Complex viscosity)

ϕ ：応力とひずみの位相のずれ

6. 実験結果と考察

(1) 破壊時のひずみ (ϵ_b)

図-1 はひずみ速度が 7.93×10^{-2} の場合の各温度における破壊時のひずみの大きさを示している。高温になるほど、またバインダー量の増加するほど破壊時のひずみが大きくなる。どの配合においても全体として上・下限値をもつ S 字形曲線を描き、40°C から低温側で急激な破壊時のひずみの低下を示す。また、ひずみ量の上限值は下限値の約 10 倍となっており、温度変化に基づくその差はきわめて大きい。1:4 と 1:8 を比較するとき、その差は -20°C において 1.4×10^{-3} 、70°C において 2.2×10^{-2} となっており、配合によってもその破壊時のひずみの差は大きい。このことは実用上、配合の選択に非常に大きな意味をもつものと受けとられる。

(2) 曲げ強さ (σ_b)

図-2 はひずみ速度が 7.93×10^{-2} の場合の各温度における曲げ強さを示す。約 20°C 以下の温度で 1:4 および 1:6 配合は 300 kg/cm^2 、1:8 配合は 180 kg/cm^2 のほぼ一定の曲げ強さをもち、この温度より高温になるにしたがって曲げ強さは低下する。またバインダー量が多くなるにしたがって温度軸に対する曲げ強さの傾き (温度依存性) が大きくなる傾向がみられる。

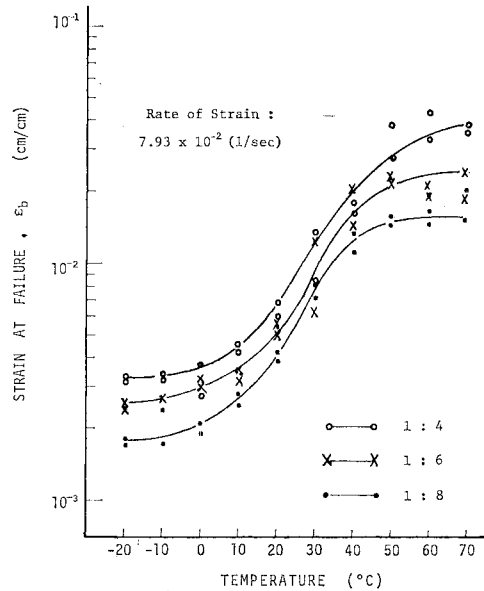


図-1 バインダー量を変えた混合物の破壊時のひずみと温度の関係

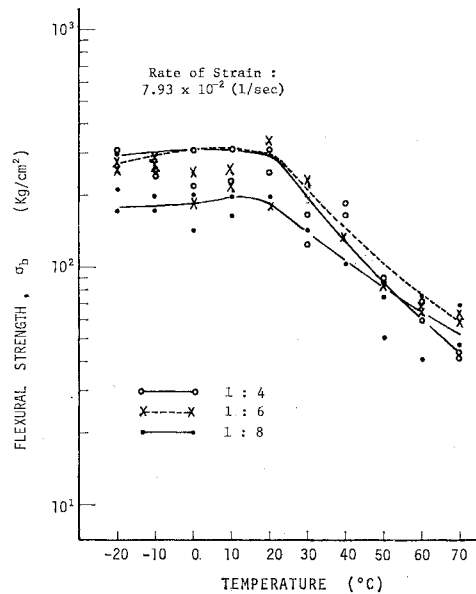


図-2 バインダー量を変えた混合物の破壊時の曲げ強さと温度の関係

(3) 破壊性状

T.L. Smith は無定形高分子材料の破壊性状を論じる場合に破壊包絡線概念を用いれば温度、時間 (ひずみ速度) の試験条件と独立に破壊性状を論じ得ることを見いだした。筆者らはこの考え方を混合物に適用すべく、4 オーダーのひずみ速度 ($7.93 \times 10^{-5} \sim 7.93 \times 10^{-2}$) にわたる同一試験機による定ひずみ速度試験とクリープ試験を行い、図-3 に示す破壊包絡線を得た。図の複雑さ

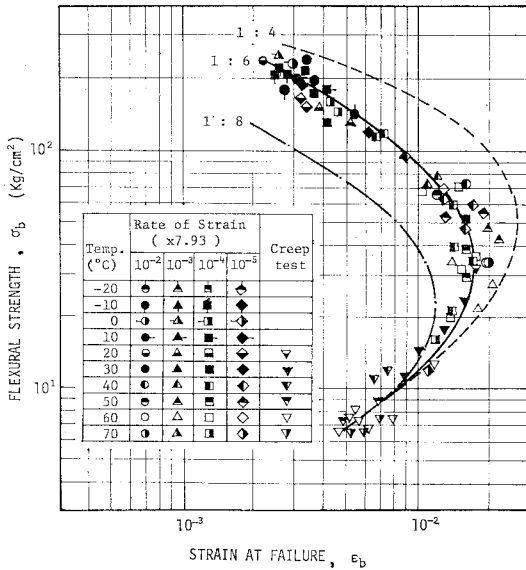


図-3 バインダー量を変えた混合物の破壊時のひずみと曲げ強さの関係 (破壊包絡線)

を避けるため測定値は1:6配合のみについて示し、1:4および1:8配合についてはプロットの結果得られた破壊包絡線を示す。T.L. Smithは任意温度を T_0 、試験温度を T として縦軸に $\log \sigma_b \times T_0/T$ 、横軸に $\log 100 \epsilon_b$ のスケールでプロットしているが、本論文においては縦軸の T_0/T という温度補正をしなくても得られる精度に影響がないため、この補正項を省略している。どの配合についても定ひずみ速度試験による破壊性状とクリープ試験による破壊性状がある重なりをもって連続的に変化する破壊包絡線を得たが、図-3から明らかなようにいずれも極限ひずみをもっている。またバインダー量の多い配合ほど極限ひずみが大きくなっている。通常破壊包絡線はあるばらつきのある平均値をとって描かれ(図-3も同様に描いた)、曲線の内側では非破壊の状態であると定義されるが、包絡線があるばらつきのある平均値を結んだ線である以上その内側において破壊することもあり得る。すなわち、設計への適用を考える場合には最も内側の測定値を結んで得られる曲線を破壊包絡線と考えるのが安全かつ妥当であろう。

(4) 動的性状

混合物中のバインダーと骨材の配合比が1:4~1:8の5種の混合物について動的性状を得たが、図の繁雑さをさけるためそのうち1:6配合の混合物について、 $|E^*|$ 、 E' 、 E'' 、 $\tan \phi$ 、 $[\eta^*]$ と载荷時間の関係を図-4に示す。なお、0.01~20 Hzの周波数範囲で得られた0°Cと10°Cにおける動的性状は20°Cのそれとほぼ同一なのでここでは省略する。

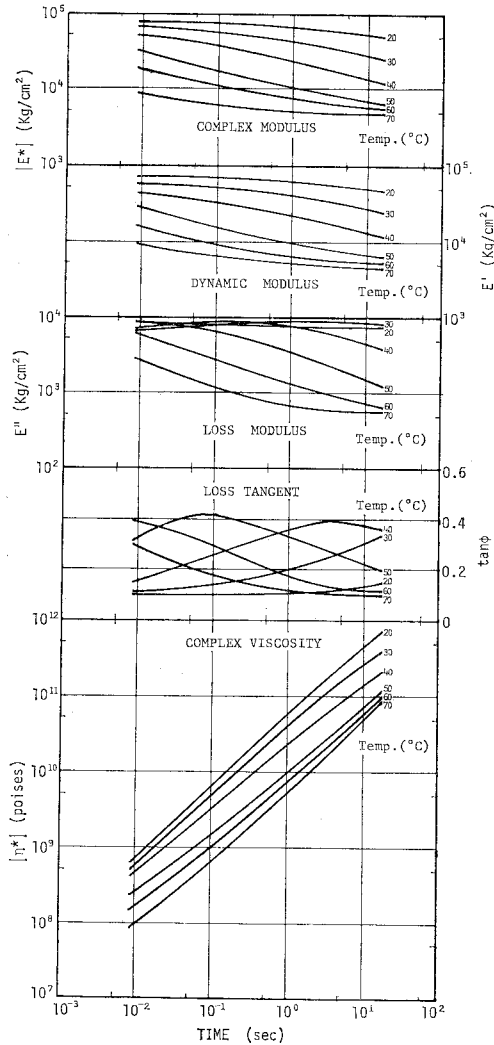


図-4 複素弾性率、動的弾性率、損失弾性率、損失正接、複素粘性率と载荷時間の関係 (1:6配合)

a) 複素弾性率 ($|E^*|$)

低温および短時間载荷になるにしたがって $|E^*|$ は大きくなり、20°Cではほぼ上限値 $8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ を得た。この値はセメントコンクリートの弾性係数が 1.4×10^5 であることを考えると約57%である。また、道路舗装の供用温度の上限と考えられる70°Cにおいては、 $|E^*|$ は $5.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ の下限値を得た。約40°Cで载荷時間依存性が最も大きくなることが注目される。

b) 動的弾性率 (E')

20°Cではほぼ上限値 $8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、70°Cではほぼ下限値 $5.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ をもつ E' の曲線は $|E^*|$ のそれに類似である。つまり、 E' の温度および载荷時間依存性は $|E^*|$ のそれらとほぼ同一である。载荷時間依存性が最も顕著な温度帯である40~50°Cで E' は $|E^*|$ より

若干小さくなる。

c) 損失弾性率 (E'')

E'' の温度および載荷時間依存性は E' のそれらとはかなり異なっている。高温になるにしたがって顕著な温度および載荷時間依存性を示し、 40°C で $9 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$ のほぼ上限値を、 70°C で 10^2 秒より長い載荷時間でほぼ一定値 (下限値) $5.7 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ をもつ。

d) 損失正接 ($\tan \phi$)

本実験の周波数範囲内では 40°C と 50°C で上限値 0.43 をもつ曲線を得た。この温度より低温側では長時間載荷になるほど $\tan \phi$ が増加し、逆に高温側では長時間載荷になるほど $\tan \phi$ は減少する。載荷時間 10^2 秒を境にして、 20°C ではこれより短時間載荷で、 70°C ではこれより長時間載荷でほぼ同一の下限値 0.12 をもつ。動的性状のうち、 $\tan \phi$ は特に粘性的要素として重要な意味をもち、アスファルトなどの他の粘弾性体との比較において、詳細な検討が必要とされる性状であろう。

e) 複素のび粘性率 ($|\eta^*|$)

全体として温度の低下および載荷時間の増大とともに $|\eta^*|$ は増加するが、 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$ では他の温度に比較して $|\eta^*|$ の載荷時間依存性は若干低下する。また他の動的性状と比較して特に載荷時間依存性が顕著である。

(5) ひずみの差による動的性状の検討

供試体中央部に与えるひずみを変えて動的載荷試験を

行い、その影響について検討を試みた。 2.3×10^{-4} および 5.5×10^{-4} の2種のひずみレベルにおいて、そのとき生ずる応力および位相角について解析を行った。その結果、本研究で行った温度、周波数、ひずみレベルにおいてはほぼ同一の値が得られた。これは与えたひずみおよび応力の大きさが線形粘弾性領域であることから当然といえよう。

(6) 時間・温度重ね合わせの原理の導入

a) 導入の妥当性

熱レオロジー的に単純な物質に適用される時間・温度重ね合わせの原理を混合物の試験結果に導入が可能か否か検討を行った。熱変形温度は樹脂の温度特性、耐熱性を知る目安として使われており、この温度における力学性状把握の意義は大きい。そこで熱変形温度試験 (ASTM D 648-56) による本実験材料のそれ (42°C) に近い 40°C を基準にして他の温度における測定値を時間軸 (横軸) に平行にシフトした結果マスターカーブが得られた。 $|E^*|$, E' , E'' , $\tan \phi$ のマスターカーブを図-5 に、 $|\eta^*|$ のマスターカーブを図-6 に示す。なおシフト量を図-6 に併記する。図-5 と図-6 には 1:4, 1:6, 1:8 配合のマスターカーブを示したが、1:5, 1:7 配合についても同様の手順でマスターカーブを描いたことはいうまでもない。きわめて精度よくマスターカーブを描くことができ、またシフトファクターと温度の関係を一本のスムーズな曲線で表現できることなどから、混

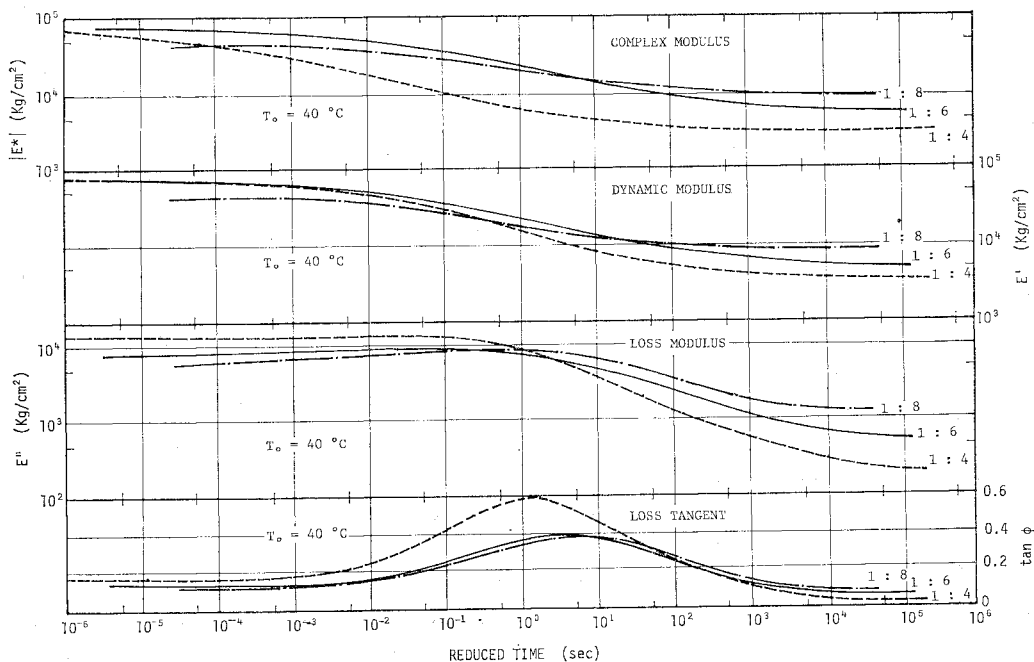


図-5 複素弾性率、動的弾性率、損失弾性率、損失正接と載荷時間の関係を示すマスターカーブ

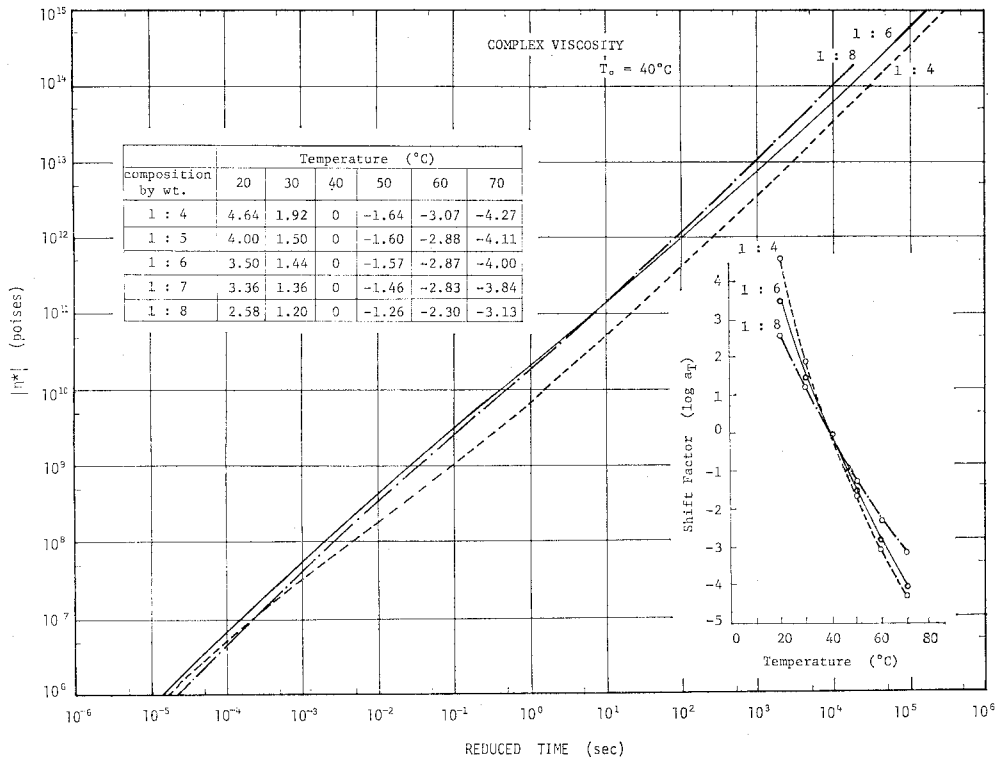


図-6 複素粘性率と载荷時間の関係を示すマスターカーブおよび各種配合比のシフトファクターの値

合物に時間・温度重ね合わせの原理を導入することの妥当性を傍証したといえよう。

b) シフトファクターについての考察

図-6 の中に表として示したシフトファクターの値を温度に対してプロットしてみるとどの配合比についてもスムーズな曲線が得られる。また、シフトファクターは载荷時間および温度依存性を示すものであるが、骨材量の増加とともにシフト量が小さくなっていることが注目される。

c) マスターカーブについての考察

40°C を基準温度にとってシフトした結果得られた 1 : 4, 1 : 6, 1 : 8 配合比の各種動的性状のマスターカーブについて共通している点を述べる。

$|E^*|$, E' は短時間载荷で上限値を示し、载荷時間の増大とともに減少しはじめ、長時間载荷で下限値をもつ。

E'' は $10^{-1} \sim 10^0$ 秒の载荷時間で上限値をもち、これより短い载荷時間、あるいは長い载荷時間になるにしたがって減少する。減少の程度は長時間载荷の方がはるかに大きい。

$\tan \phi$ は $10^0 \sim 10^1$ 秒の载荷時間で上限値を示し、 E'' と似た傾向を示すが、他の動的性状の载荷時間依存性の最も著しい载荷時間領域にその上限値をもっている。

$|\eta^*|$ のマスターカーブはほぼ直線に近いゆるやかな S

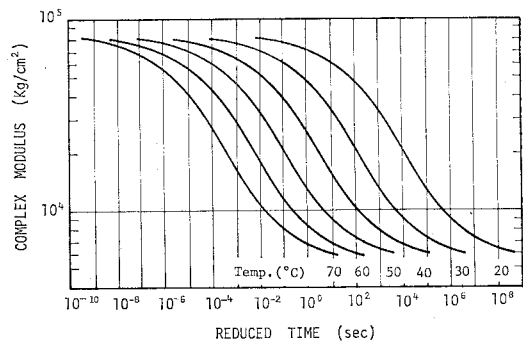


図-7 種々の温度における複素弾性率と载荷時間の関係を示すマスターカーブ (1:6 配合)

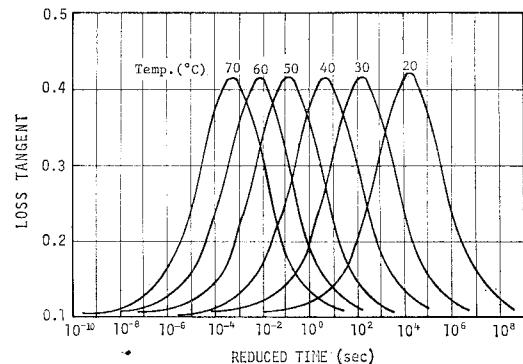


図-8 種々の温度における損失正接と载荷時間の関係を示すマスターカーブ (1:6 配合)

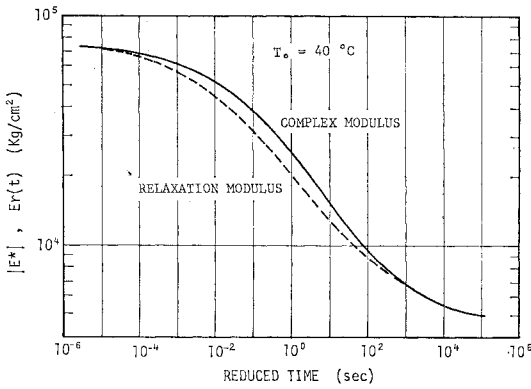


図-9 緩和弾性率および複素弾性率と載荷時間の関係を示すマスターカーブ (1:6 配合)

字形をなしているが、特に載荷時間依存性が大きい。

動的性状全般についていえることはバインダー量の多い配合ほど載荷時間に対する動的性状の変化が大きい(載荷時間依存性が大きい)点である。なお、図-5、図-6には基準温度として選んだ 40°C におけるマスターカーブを示したが、他の温度においてもシフトファクターから同様に曲線を描くことができるのはいうまでもない。一例として、1:6 配合比の $|E^*|$ および $\tan \phi$ を各測定温度ごとにそれぞれ 図-7、図-8 に示す。

(7) 緩和弾性率

van der Poel によって定義されたスティフネス概念¹²⁾については、アスファルトの分野においてその有用性について高い評価が与えられている⁹⁾。しかし、温度応力、長時間領域における混合物の力学性状を評価する場合、緩和弾性率を用いる方がより合理的であると思われる¹³⁾。Ninomiya-Ferry の式^{7),14)}を用いて動的性状から緩和弾性率 $E_r(t)$ を求め、図-9 に 1:6 配合比について $|E^*|$ のマスターカーブとともに示す。

図-9 から 10^{-3} 秒以下の短時間載荷および 10^3 秒以上の長時間載荷では $|E^*|$ と $E_r(t)$ の値はほぼ近似し、約 $10^{-3} \sim 10^3$ 秒の載荷時間領域で両者の差が大きくなる。このことは、 $|E^*|$ は応力とひずみの比として表現され、 $E_r(t)$ は応力・ひずみ曲線の接線勾配として表現されることから、あらためて論ずる必要は認めない。

(8) バインダー量の影響

バインダー：骨材の配合比によって力学性状がどのように異なるかの検討を行った。これは使用の目的ごとに最適配合を決定するのにきわめて重要な点である。

a) 破壊時のひずみおよび曲げ強さ

どの配合においてもほぼ上限値と下限値をもつことは共通しているが、バインダー量の増加とともに破壊時の

ひずみが大幅に増大する。

また曲げ強さにおいても上限値をもつことは共通しているが、20°C より高温側における曲げ強さの低下はバインダー量が多いほど大きい。つまり、バインダー量の多い混合物ほど温度依存性(感温性)が大きい。曲げ強さと破壊時のひずみの関係(破壊包絡線)からもバインダー量の多いほど極限ひずみが大きくなることなど同様のことがいえよう。

b) 動的性状

図-5、図-6 から明らかなように各種動的性状はバインダー量の増加とともに載荷時間依存性が大きくなる。つまり、供用温度範囲においてバインダー量の多い配合ほど各種動的性状が載荷時間によって大きく変化する。

温度依存性を検討するには横軸に温度をとって時間・温度重ね合わせの原理を適用し、これまで述べたのとまったく同様の手順をふんでマスターカーブを描くといいが、ここでは通常車両の走行によって生じるとされている 10^{-2} のオーダーの載荷時間 (5×10^{-2} 秒) を選び、このときの各温度における $|E^*|$ の値を配合別に 図-10 に示す。

図-10 から明らかなようにバインダー量の増加とともに著しく温度依存性が大きくなっている。20°C においてバインダー量の大きい 1:4 配合が最も大きな $|E^*|$ の値を示すが、70°C においては最も骨材量の多い 1:8 配合が大きな $|E^*|$ を示しており、実際の供用温度範囲においてかなりの変化を示している。

図-11 は以上の傾向をさらに確認するために、 $|E^*|$

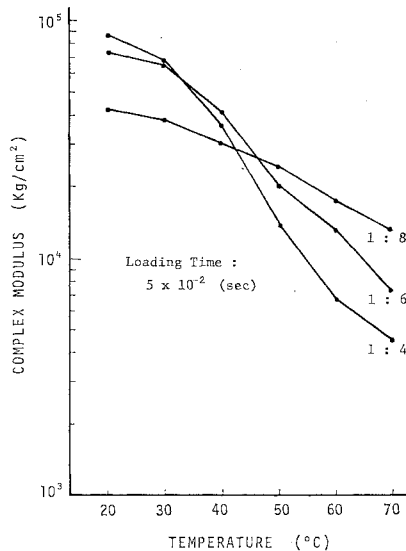


図-10 バインダー量を変えた混合物の複素弾性率と温度の関係 (載荷時間: 5×10^{-2} 秒)

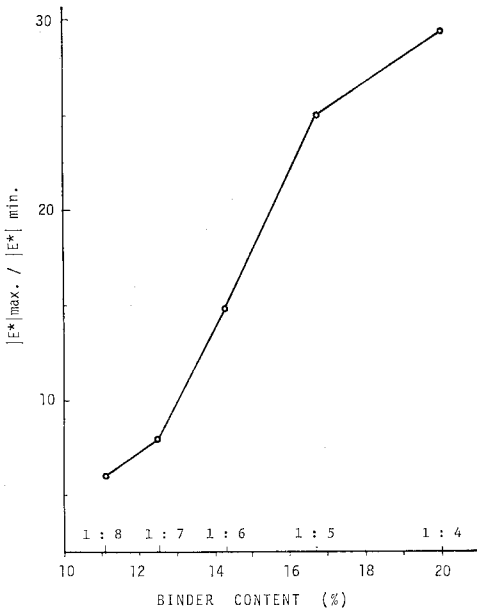


図-11 $|E^*|_{max}/|E^*|_{min}$ とバインダー量の関係

の測定値の上限値と下限値の比を比較した図である。温度および荷重時間依存性を含んだ図であるが、上限値を示す 20°C の短時間荷重領域および下限値を示す 70°C の長時間荷重領域では $|E^*|$ の荷重時間依存性はほとんど見られないので、ほぼ温度依存性について示した図と考えてさしつかえない。図-11 から、バインダー量の増加とともに温度依存性が大きくなるのは明らかであるが、ここで注目したいことは配合比 $|E^*|$ 比のプロットによって得られた曲線が全体として S 字形を描き、ほぼその中心（この曲線の接線勾配の最も大きい点）が 1:6 配合付近にあることである。このことは、1:4 配合や 1:8 配合に比較して 1:6 配合付近では若干のバインダー量の変化が大きく温度依存性を変化させることを意味しており、1:6 配合付近の施工が多いことを考えると、きわめて重要な指摘となる。

7. アスファルト混合物との比較

舗装材料として広く使用されているストレートアスファルトを選び、密粒度アスファルトコンクリート配合（以下、アスファルトコンクリートと称す）として試験を行った。以下にエポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートの各種力学性状の差異について比較検討する。なお、アスファルトの性状と粒度配合を表-4 に示す。

(1) 破壊時のひずみおよび曲げ強さ

エポキシ樹脂混合物（最も施工実績のある 1:6 配合

表-4 密粒度アスファルトコンクリートの配合表およびアスファルトセメントの性状表

骨材粒度 (mm)	通過重量率 (%)	摘要
13	100	ストレートアスファルト 針入度 (25°C, 100 g, 5 秒) : 79 軟化点 T R&B : 47.5 PI: -0.7
10	84	
7	69	
5	59	
2.5	43	
1.2	30	
0.6	20	アスファルト量: 5.8%
0.3	13	
0.15	6	
0.074	6	

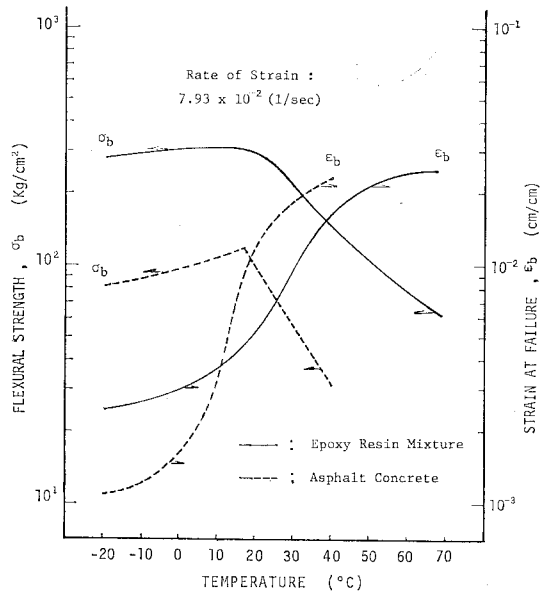


図-12 エポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートの破壊時ひずみおよび曲げ強さと温度の関係

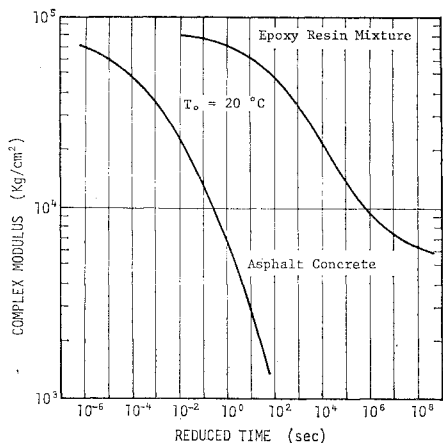
を一例としてとりあげる)とアスファルトコンクリートの破壊時のひずみおよび曲げ強さを図-12 に示す。

破壊時のひずみについては約 10°C を境にして、低温側ではエポキシ樹脂混合物が、高温側ではアスファルトコンクリートが大きな破壊時のひずみを示した。なお、破壊時のひずみの温度依存性はエポキシ樹脂混合物の方が小さいことが明らかにされた。

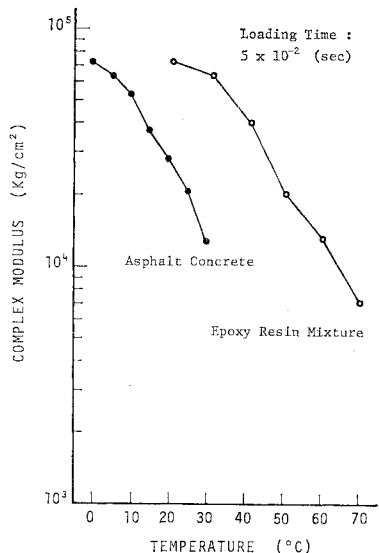
曲げ強さは全温度領域にわたってエポキシ樹脂混合物の方が大きく、温度依存性はアスファルトコンクリートの方が大きいことが明らかにされた。

(2) 動的性状

正弦的に変化する 2.3×10^{-4} のひずみを入力としたとき得られる動的性状のうち、まず $|E^*|$ について検討する。



図—13 エポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートの複素弾性率と載荷時間の関係を示したマスターカーブ

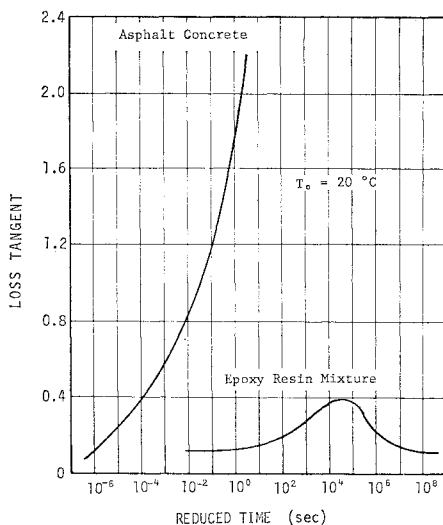


図—14 エポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートの複素弾性率と温度の関係（載荷時間： 5×10^{-2} 秒）

図—13 はエポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートについて、 20°C を基準温度にしてシフトしたとき得られた $|E^*|$ のマスターカーブである。明らかにエポキシ樹脂混合物の $|E^*|$ の方が大きく、載荷時間依存性もエポキシ樹脂混合物の方がはるかに小さい。

温度依存性（感温性）を確かめるため、 5×10^{-2} 秒の載荷時間における $|E^*|$ を各温度ごとに示したのが図—14 である。図—14 から高温になるにしたがってアスファルトコンクリートの感温性が大きくなるのがわかる。

エポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートの粘性的要素を比較するため、基準温度を 20°C にとった



図—15 エポキシ樹脂混合物およびアスファルトコンクリートの損失正接と載荷時間の関係を示すマスターカーブ

$\tan \phi$ のマスターカーブを 図—15 に示した。図—15 から明らかなように、 10^{-2} 、 10^{-1} 、 10^0 秒の載荷時間でアスファルトコンクリートの $\tan \phi$ はエポキシ樹脂混合物の $\tan \phi$ のそれぞれ約 3.9 倍、5.6 倍、7.8 倍となり、載荷時間が長くなるとともにその差が増大することが明らかにされた。また、載荷時間依存性についてもアスファルトコンクリートの方がエポキシ樹脂混合物よりもはるかに大きい。これらの結果から、エポキシ樹脂混合物に比較してアスファルトコンクリートの方がはるかに粘性的性状を示す材料であることが明らかにされた。

8. 結 論

エポキシ樹脂混合物の力学性状を把握するため、高速曲げ試験および実際に舗装体がおかれる道路環境を反映させた動的載荷試験、の両試験をバインダー量の異なる両混合物に適用し、破壊時のひずみ、曲げ強さ、動的性状などを求めた。さらに既往舗装材料との比較の意味で、アスファルトコンクリートについても同様の試験を適用し、両材料の力学性状の相違について検討した。

以上の実験・解析から得られた結論はこれを次のように要約することができる。

(1) 舗装材料としての利用を想定したエポキシ樹脂混合物の力学性状を把握するため、レオロジー手法に基づいて考察を加え、 $20 \sim 70^{\circ}\text{C}$ の温度領域でレオロジー論の成立の妥当性を傍証した。 20°C 以下 10°C 、 0°C については 20°C とほぼ同様の動的性状を得た。

(2) その結果、約 12 オーダーの載荷時間領域にわたる動的性状を得た。特に複素弾性率、動的弾性率、損

失弾性率，損失正接については上・下限値をもつマスターカーブを得ることができた。

(3) 供用温度範囲を網羅すると思われる温度領域に対する破壊時のひずみをプロットして得られた曲線はほぼ上・下限値をもつS字形の曲線になり，その上限値は下限値の約10倍である。同様に，ほぼ20°Cで上限値をもつ曲げ強さの温度に対する曲線を得ることができた。さらにクリープ試験のデータを加えることにより破壊包絡線を描いた。

(4) 骨材量の増減による混合物の力学性状を比較した場合，温度依存性および載荷時間依存性は骨材量の多い混合物ほど低下する。破壊時のひずみは骨材量の多い混合物ほど減少するが，曲げ強さおよび動的性状については一義的にいえない。

(5) アスファルトコンクリートの力学性状と比較した場合，変形係数，曲げ強さはエポキシ樹脂混合物の方が大きい，破壊時のひずみは約10°Cを境にして高温側ではアスファルトコンクリートの方が，低温側ではエポキシ樹脂混合物の方がそれぞれ大きい破壊時のひずみをもつ。

(6) エポキシ樹脂混合物の力学性状の温度依存性および載荷時間依存性はアスファルトコンクリートよりはかなり低く，アスファルト舗装の上に舗設される場合があるとすれば，その性状の差は舗装体の層の構成，力学性状を論ずる際に問題とならう。

(7) 一方，一般的な土木材料としての見地からすれば，たとえばセメントコンクリートの弾性率は0~70°Cの供用温度範囲でほとんど変化を示さないのに対し，混合物は変化の小さい1:8配合でも $|E^*|_{\max}/|E^*|_{\min}$ が約6倍になるなど，その温度依存性，載荷時間依存性は無視できないほど大きいと考えなければならぬ。

(8) これらの結果からバインダーの質が異なることによりその力学性状は著しく違うことがわかる。エポキシ樹脂混合物とアスファルトコンクリートは似た力学性状ないしは傾向を示す部分があるにしろ，本質的にはまったく異質の材料といった方がよく，利用にあたってはその異質である部分についての認識を深める必要がある。

9. おわりに

以上主として舗装用として考えたエポキシ樹脂混合物の基礎的力学性状について論じてきたが，経済性，施工性，透水性，耐劣化性状などについてなお総合的に検討する必要がある。

また，以上に述べてきたごとく基礎的な材料性状に関する研究に加え，その力学性状をさらに解明するための

今後の研究課題として

- a) 薄層として施工される場合に特に考慮すべきいくつかの事項
- b) 混合物のクリープ性状，応力緩和性状
- c) 混合物の変形の回復特性
- d) 空隙率が力学性状に与える影響
- e) 各種のバインダーについての検討（バインダー比較）

などが挙げられる。さらに一般土木材料としての見地からは他のいくつかの性状に関してもより幅広く検討を進める必要がある。a) については応力とたわみの解析，およびメンブレンの問題，b) および c) については混合物の力学性状をさらに幅広く把握するうえで重要な点であろう。d) の研究は輻圧を可能にして空隙率を小さくし，密な混合物を得られる点で重要であろう。e) については本研究で一部明らかにされたように，熱変形温度付近で力学性状の変化が著しいこと，硬化剤によって熱変形温度を変えられることなどについて目下検討を進めている。

また，概説の項において述べた下層材料との関連においてこの材料の性状を論ずることが重要であり，これらの点を考慮することにより研究の進展を期すべく考えている。

本実験研究は，北海道工業大学工学部において行ったものであり，結果の解析に関しては北海道大学 笠原 篤 助手のご助言をいただいた。ここに関係各位に厚くお礼申しあげるものである。

なお，本研究において用いた試験機に関しては，文部省の私立大学等新設理工系等理科教育設備整備補助金によって購入したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 加門 隆：エポキシ樹脂硬化剤の種類と使用条件，プラスチックマテリアル，Vol. 15, No. 2, pp. 61~69, 1974.
- 2) 橋本邦之：エポキシ樹脂，日刊工業新聞社，1973.
- 3) 間山正一：エポキシ樹脂材料の力学性状に関する研究，土木学会第29回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp. 122~123, 1974.
- 4) 間山正一：エポキシ樹脂モルタルの力学性状—主として動的性状について—，道路建設，No. 329, pp. 52~57, 1975.
- 5) 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，pp. 73~81, 1972.
- 6) 菅原照雄ほか：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，pp. 131~141, 1975.
- 7) Ferry, J.D.：高分子の粘弾性，東京化学同人，1964.
- 8) Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proceedings, 1972.
- 9) シェル化学：エンジニアリングニュース，No. 75
- 10) 札幌市交通局：札幌市高速電車走行路面施工示方書，1970.
- 11) A.S.T.M. Designation, D 790-71: Standard method of test for flexural properties of plastic, pp. 285~

- 294, 1971.
- 12) van der Poel, C. : A General System Describing the viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data, Jour. Appl. Chem., May 1954.
- 13) Secor, K.E. and C.L. Monismith : Analysis and interrelation of stress-strain-time data for asphalt concrete, Transaction of the Society of Rheology Ⅷ, pp. 19~32, 1964.
- 14) Ninomiya, K. and J.D. Ferry : Some approximate equations useful in the phenomenological treatment of linear viscoelastic data, Jour. Colloid Sci., Vol. 14, pp. 36~58, 1959. (1975.10.16・受付)
-