エポキシアスファルト混合物の応力緩和性状について

STRESS RELAXATION MODULUS OF EPOXY ASPHALT MIXTURE

間 山 正 一*・菅 原 照 雄**

By Masakazu MAYAMA and Teruo SUGAWARA

1. 概 説

近年、エポキシ樹脂を基剤とした舗装用材料の研究が盛んであり^{1)~3)}、他の土木材料に比べてかなり異なった条件下にある道路環境をも加味した研究手法がそれらに取り入れられつつある^{4), 5)}。

筆者らはエポキシ樹脂が高価であることを考慮して、主として薄層舗装用エポキシ樹脂モルタル⁴⁾としての材料挙動、あるいは硬化剤を添加したアスファルトとの混合によるエポキシアスファルトセメントおよび骨材との混合によって得られるエポキシアスファルト混合物としての使用⁵⁾を想定して一連の実験研究を行ってきたが^{6)~9)}、ここでは後者の用途を想定した研究成果について報告する。

エポキシアスファルト混合物を道路舗装に利用する場合に考慮する必要のある基礎的力学性状は種々考えられるが、その 1 つに応力緩和性状がある。セメントコンクリートに比較して応力およびひずみが緩和しやすい材料であるアスファルト混合物¹⁰⁾を舗装材料に用いる場合には通常、目地をいれない工法をとっているが、まだ目地が不要であるとの理論的根拠が明確とはいえない。

温度応力を生じさせる温度変化は長い周期(載荷時間)をもち、アスファルト混合物はそのような条件のもとでは強度はきわめて小さいが、舗装体に亀裂が生じない要因の 1 つは混合物が応力緩和をするため、または比較的伸びやすいためであると考えられている。したがって、特に混合物の応力緩和が小さい低温時において(0°C 以下という意味ではなく、たとえば 10°C 付近においても)、温度応力による亀裂やジョイント部の亀裂が懸念される。一方、エポキシアスファルト混合物はアスファルト混合物に比較してより緩和しにくい材料であること

ろから¹¹⁾、これらの問題はこの種材料の実用の可能性の検討に際してきわめて重要なことがらであろう。

通常の車輛走行に対するレスポンスとしてとらえられる混合物の力学挙動に比較して、長時間載荷領域に属する材料の挙動や温度応力を論ずる場合、変形係数としてスティフネスよりも緩和弾性率を用いた方が合理的であるとされているが¹²⁾、これらの考え方も結局は混合物の応力が減少する時間的経過、すなわち応力の緩和現象の把握によって、温度応力による亀裂またはくり返しによる一種の疲労現象を検討する点に帰すると考えられる。混合物の応力緩和性状の把握には応力緩和試験が適しているが、高度の試験機器や測定技術を必要とし、一般的には汎用性がない。しかし、他の簡便な試験法による試験結果から数学的处理によって緩和弾性率を求めることができ、緩和弾性率を介して混合物の応力緩和性状を論ずることが可能である。本論文においては応力緩和の定義にできるだけ近づけるべく動的載荷試験機の矩形波を利用し、ひずみを入力とする方法によって緩和弾性率、 $E_r(t)$ を実測し⁹⁾、さらに他の力学挙動に数学的处理を行うことによって $E_r(t)$ を求めた^{4), 13)~15)}。この結果、異なった試験法による応力緩和性状の差異についても論ずることが可能になり、また、時間と温度を変化させてレスポンスとしてこの種の混合物の力学挙動を論ずるレオロジー手法の妥当性等をより多くの試験法から確認することなども検討を試みた。

さらに、アスファルト混合物の緩和性状との差異についても論じ、エポキシアスファルト混合物の応力緩和性状をさらに明確にしようと試みた。

2. 実験材料と供試体作製方法

(1) 実験材料

エポキシアスファルト(以下、バインダーと称す)は

* 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 工学部土木工学科

表一 合材の粒度配合

Seive Opening	Pass % by wt
13.0 (mm)	100 (%)
10.0	84
7.0	69
5.0	59
2.5	43
1.2	30
0.6	20
0.3	13
0.15	6
0.074	6
Binder Content : 5.8 (%)	

エポキシ樹脂 (A剤) と硬化剤を添加したアスファルトセメント (B剤) の混合によって作製される。A剤 : B 剤の配合比率は 15.6 : 84.4 である。なお、エポキシ樹脂のエポキシ当量は 184~194 であり、これと化学当量に反応する硬化剤量 (酸化) は 55.3 である。

粒度配合およびバインダー量はアスファルト混合物の考え方を参考にして密粒度配合とした⁹⁾ (表一)。バインダー量は 5.8% を採用した。

(2) 供試体作製方法

120°C に加熱したA剤とB剤を2分間手ねりで混合して得られるバインダーと同温度に保たれた骨材をミキサで3分間混合する。混合物を型枠に入れ、ローラコンパクターで転圧後 120°C に保たれた恒温槽 (空気槽) で6時間養生する⁶⁾。養生後の混合物を室内 (18~22°C) に約 12 時間放置した後ダイヤモンドカッターで六面カットの角型棒状供試体を成型する。なお、供試体密度は約 2.340 (g/cm³) から 2.364 (g/cm³) の範囲にあり、その平均値は 2.352 (g/cm³) であった。非常によく管理されたアスファルト混合物のそれと比較してばらつきが若干大になっている。これはこの種材料の混合時において粘度管理がきわめて困難なこと、通常われわれの行っているニーディング作用を与えることができない材料であることに基づく。

3: 試験法と解析法

(1) 実験装置

本研究に使用した試験機は 108 型ダイナミックサイクラー^{4), 6)} と、筆者らがクリープ試験用に設計したクリープ試験機⁹⁾ の2機種である。前者を動的載荷試験、定ひずみ速度試験、応力緩和試験に使用し、後者をクリープ試験に使用した。両機種の用途・機能については、すでに各種の論文で紹介済みであるので^{4), 6), 9)}、詳細は省略し、ここでは主たる機能についてのみ説明する。

動的試験機の機能として、

- ㊤ 制御方式：変位・ひずみ・応力からの電気・油圧サーボ制御方式
- ㊦ 波 形：正弦波・三角波・矩形波・ランプ入力
- ㊧ 最大許容荷重：±5 000 kg

図一 各種試験法の概念図

- ㊨ 最大変位振幅：±50 mm
- クリープ試験機の機能として、
- ㊩ 荷重範囲：35 g~30 kg
- ㊪ 最大許容変位：70 mm
- ㊫ スパン：6.4, 10, 15, 20, 25 cm
- ㊬ 載荷方式：中央集中3点曲げ載荷方式

(2) 試験法

本研究においては、定ひずみ速度試験、動的載荷試験、クリープ試験、応力緩和試験の4種類の試験を行ったが、これらの試験の概念図を図一に示す。

なお、入力とは供試体への載荷条件を示し、出力とは入力に対する供試体のレスポンスとして得られる情報を意味する。いずれの試験法においても時間の関数として処理されることはいうまでもない。

さらに、この種混合物は、載荷時間と温度に依存する力学挙動を示すことから、レオロジー手法の導入をもってその力学性状を論ずる妥当性が種々の研究結果から証明されている^{4), 5), 9), 11)}。したがって、本研究においても時間および温度を変えて実験を行った。

温度制御は恒温槽内で所定温度のブラインを得、これと試験槽とをポンプで循環することによって行った。

なお、実験に使用する供試体と同一条件で作製した熱電対を埋めこんだ供試体とを同時に恒温槽に入れ、ダミー供試体で所定の温度に達したのを確認した後、5分後に実験を開始した。また、各試験の温度、載荷時間、ひずみ速度等は舗装体の供用範囲を十分に網羅する領域で実験を行ったが、これらの実験条件を要約して表二に示す。

(3) 動的載荷試験

混合物に正弦的に変化するひずみ ϵ を入力としてイ

表-2 試験条件

	Loading Conditions (Bending)			
	Dynamic Loading	Const. Rate of Strain	Creep	Stress Relaxation
Size of Sample	4×4×35 cm	2.5×2.5×25 cm	2.5×2.5×25 cm	2.5×2.5×25 cm
Strain or Stress	2.086×10 ⁻⁴ cm/cm	—	See Table 3	3.64×10 ⁻⁴ cm/cm
Rate of Strain	0.01~10 Hz	2.912×10 ⁻⁴ ~2.912×10 ⁻⁴ sec ⁻¹	—	—
Test Temperature	0~+60°C	-20~+70°C	0~+60°C	-10~+40°C
Span	30 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Loading Method	Four Points	Three Points	Three Points	Three Points

ンプットした場合ある位相角 ϕ をもって応力 σ が検出されることはすでに述べた⁴⁾ (図-1 参照). スティフネスと同じものと考えられる複素弾性率 $|E^*|$ は, σ と ϵ の比として表現され, この実数部である動的弾性率, $E' = |E^*| \cos \phi$, 虚数部である損失弾性率, $E'' = |E^*| \sin \phi$ でそれぞれ定義される. なお, ϵ および σ は変形量がきわめて小さいことから通常この種の解析に用いられている次式を用いた¹⁶⁾.

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

$$\sigma = \frac{6Pl_1}{bh^2}$$

ここで, h : 供試体の高さ (cm), d : 供試体中央部の変位 (cm), l : スパン (cm), l_1 : 載荷点間隔 (cm), P : 荷重 (kg), b : 供試体の幅 (cm)

さて, 混合物の動的性状と静的性状の関係はきわめて興味ある問題であるが, Ninomiya と Ferry は動的性状から静的性状を求めるいくつかの試みを行っている.

ここでは静的力学性状の1つである緩和弾性率を求める近似式を利用して計算を行う^{14), 15)}.

$$E_r(t) = E'(\omega) - 0.40 E''(0.40 \omega) + 0.014 E''(10 \omega)$$

ここで, ω は角速度を意味し, 周波数 f に比列し載荷時間 t に逆比列する. すなわち, $\omega = 2\pi f = 1/t$ で表現される.

(4) 定ひずみ速度試験

中央集中3点曲げ載荷をした場合, 応力 σ , ひずみ ϵ , スティフネス $S(t, T)$, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ はそれぞれ次式で示される.

$$\sigma = 3Pl/2bh^2$$

$$\epsilon = bhd/l^2$$

$$S(t, T) = \sigma/\epsilon$$

$$\dot{\epsilon} = bhd\dot{d}/l^2$$

ここで, $\dot{d}$: 変位速度 (cm/sec)

また, 緩和弾性率 $E_r(t)$ は,

$$E_r(t) = \sigma_r/\epsilon_r(d \log \sigma_r)/(d \log \epsilon_r)$$

で表現される.

ここで, 換算応力 (reduced stress), $\sigma_r = \sigma/\dot{\epsilon}$, 換算ひずみ (reduced strain) $\epsilon_r = \epsilon/\dot{\epsilon}$ でそれぞれ表わされる.

換算ひずみはその定義から載荷時間 t と同じもので

ある.

(5) クリープ試験

一定荷重 P_0 を載荷したとき, クリープ曲線 (図-1 参照) から $\sigma = 3P_0/l/2bh^2$, $\epsilon = bhd/l^2$, $J(t) = \epsilon/\sigma_0 = 1/E_c(t)$ が得られる. ここで, $E_c(t)$ はクリープコンプライアンス $J(t)$ の逆数で表現され, スティフネスと同じものである.

次に, $J(t)$ と $E_r(t)$ の関係は次式で示される^{12), 17)}.

$$\int_0^t E(\tau)J(t-\tau)d\tau = \int_0^t E(t-\tau)J(\tau)d\tau = t$$

ここで, E は緩和弾性率, J はクリープコンプライアンス, t は任意時間, τ は緩和時間を示す.

筆者らは Hopkins と Hamming が示した厳密解¹⁷⁾によって $J(t)$ から $E_r(t)$ を電子計算機で算出した.

4. 実験結果

(1) 動的載荷試験

表-2 に示した条件で実験を行った結果得られた動的

図-2 動的弾性率, 損失弾性率と載荷時間の関係およびマスターカーブとシフトファクター・温度曲線

弾性率 (E') および損失弾性率 (E'') と载荷時間の関係を 図-2 に示す。

E' は高温になるにしたがって、また、長時間载荷になるにしたがって減少するが、その割合 (温度依存性) は、みかけ上、低温側の短時間载荷領域および高温側の長時間载荷領域では小さい。また、 $1.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ のほぼ上限値をもつように思われる。

E'' は E' と異なった挙動を示し、 20°C の中間の時間領域で $2 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ の上限値を示し、 30°C より高温側では長時間载荷になるにしたがって E'' は減少する。 10°C より低温側では短時間载荷領域になるにしたがって E'' が減少する。これは中間の载荷時間で運動の量と時間がともに大きいためエネルギーの散逸が行われ、したがって E'' が大きくなるものと考えられる。

図-2 には基準温度 T_0 を 20°C にとり、時間・温度重ね合せの原理を適用した結果得られた E' , E'' のマスターカーブとシフトファクター・温度曲線を併記した。基準温度の選択は任意であり、通常常温として使用される意味で 20°C を採用して 20°C におけるマスターカーブを描いたが、他の温度におけるマスターカーブはシフト量から逆に得られることはいうまでもない。

(2) 定ひずみ速度試験

3 オーダーのひずみ速度にわたって曲げ定ひずみ速度

図-3 換算応力と換算ひずみの関係

試験を行い、図-3 に示す換算応力 (σ_r) と換算ひずみ (ϵ_r) の関係を得た。なお、この種の実験結果の解析には線形領域の限界が問題になるが、ここでは 1% 以内を線形と仮定して解析を行った。

図-3 から明らかなように任意の ϵ_r (载荷時間 t と同じもの) で考えた場合、低温側で σ_r が大きい。このことは σ_r と ϵ_r の比がスティフネスであることを考えると高温側より低温側の方がスティフネスが大きいことを意味する。また、 σ_r - ϵ_r 曲線の単純勾配は低温側でほぼ 1 (45° の勾配) をもち、中間の温度で緩やかになり高温側でまた急になってくる。このことは、この载荷時間の範囲では低温側でほぼ载荷時間に依存しないスティフネスをもち、中間の温度で大きな依存性を示してスティフネスが減少し、高温側で減少を示すがその载荷時間依存性は小さくなることを意味する。さらに緩和弾性率は σ_r - ϵ_r 曲線の接線勾配とスティフネスの積であることを考えれば中間の温度でスティフネスと緩和弾性率が大きく異なってくることは容易に理解できるであろう。

$T_0 = 20^\circ\text{C}$ における σ_r - ϵ_r 曲線のマスターカーブとシフトファクター・温度曲線を 図-4 に示したが、中間の载荷時間で勾配が緩やかになっていることから、この時

図-4 換算応力と換算ひずみの関係を示すマスターカーブおよびシフトファクター・温度曲線

図-5 クリープコンプライアンスと载荷時間の関係およびマスターカーブとシフトファクター・温度曲線

間帯でスティフネス、緩和弾性率の载荷時間依存性が大きくなり、またスティフネスと緩和弾性率の差（スティフネスより緩和弾性率が小さくなる割合）が大きくなることは肯首で可よう。

(3) クリープ試験

実験結果得られたクリープコンプライアンス $J(t)$ と载荷時間の関係およびそのマスターカーブとシフトファクター・温度曲線を 図-5 に示す。

$J(t)$ はクリープ弾性率 $E_c(t)$ の逆数で表現されることから、高温になるにしたがって上昇し、また载荷時間が長くなるにしたがって増大する。これは高温・長時間载荷領域においてクリープ変形に対する抵抗が小さくなることを意味する。高温・長時間载荷領域、低温短時間载荷領域で载荷時間依存性がきわめて小さくなる。

横軸に平行にシフトして得られた $J(t)$ のマスターカーブ ($T_0=20^\circ\text{C}$) から明らかなように、中間の载荷時間で载荷時間依存性が顕著になり短時間および長時間の領域で依存性が小さくなる。特に長時間载荷領域ではほぼ $J(t)$ の上限値に近づいているように思える。このことは、 $J(t)$ の逆数で表現される $E_c(t)$ がスティフネスと同じものと考え合せると、スティフネスがほぼ下限値に近づくことを意味し、設計への応用を含む重要なデータとなるであろう。

なお、クリープ試験は荷重レベル依存性の強い試験であるが、データのばらつき等を考慮した結果、表-3 に示す荷重が比較的精度の高いデータを得られることがわかった。

(4) 応力緩和試験

応力緩和試験やひずみ緩和試験(クリープ試験)では入力とするひずみレベルや応力レベルが問題となる。本研究では5種類のひずみレベ

表-3 クリープ試験の温度と荷重の関係

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Load (kg)
0	22~25
10	18~22
15	12~18
20	9~12
25	7~9
30	7~9
40	4~7
50	2~4
60	2~3

図-6 緩和弾性率のひずみレベル依存性

図-7 緩和弾性率と载荷時間の関係およびマスターカーブとシフトファクター・温度曲線

ルによって緩和弾性率のひずみレベル依存性を検討したが、その一例を载荷時間 100 秒における $E_r(t)$ とひずみレベルの関係で 図-6 に示す。 $E_r(t)$ のひずみレベル依存性は温度によっても異なるが、ひずみの小さい領域で安定した $E_r(t)$ が得られるようである。したがって、本研究においては 3.64×10^{-4} のひずみで応力緩和試験を行った。温度を変えて行った緩和弾性率と载荷時間の関係を温度をパラメーターにして 図-7 に示す。载荷時間が長くなるにしたがって、また温度が高くなるにしたがって $E_r(t)$ が減少する。 $E_r(t)$ の増減は常温付近で著しく、逆に低温側の短時間载荷領域ではほぼ $E_r(t)$ の

図-8 各温度における緩和弾性率のマスターカーブ

上限値に達し、高温側の長時間載荷領域ではしだいに下限値に近づく。

換算変数法を利用して得られた基準温度 20°C のマスターカーブではこの傾向を反映し、短時間載荷領域ではほぼ上限値の $E_r(t)$ をもち、長時間載荷領域でしだいに下限値に近づく傾向を示す。

図-7 には基準温度 20°C における $E_r(t)$ のマスターカーブを示したが、他の温度におけるマスターカーブはシフトファクター vs. 温度曲線から描くか、あるいはそれぞれの温度を基準温度にしてシフトして得られ、図-8 に示すような種々の温度におけるマスターカーブ群が与えられる。

5. 各種試験から得られた緩和弾性率について

試験法、載荷方式の異なる4種の試験法から得られる緩和弾性率 $E_r(t)$ 、すなわち、 $E_r(t)$ を実測する応力緩和試験、計算処理によって $E_r(t)$ を求める定ひずみ速度試験およびクリープ試験、前3者の静的載荷方式とまったく異なる動的載荷試験結果から近似法によって $E_r(t)$ を求める方法等の手順で得られた $E_r(t)$ のマスターカーブおよびシフトファクター・温度曲線について比較してみる。

(1) 緩和弾性率

4種の実験解析によって得られた $E_r(t)$ のマスターカーブとシフトファクター・温度の関係を比較して図-9 に示す。ここではマスターカーブについて主として述べ、シフトファクターと温度の関係については後述する。

10^{-5} 秒付近の短時間載荷領域で $E_r(t)$ の実測値約 $1.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ をはさんで定ひずみ速度試験ではこれより大きい約 $1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ の $E_r(t)$ を、動的載荷試験ではこれより小さい約 $1.06 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ の $E_r(t)$

をもつ。 $10^{-2} \sim 10^0$ 秒付近の中間の載荷時間では定ひずみ速度試験が大きい $E_r(t)$ をもち、たとえば 10^{-1} 秒の載荷時間で約 $6 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、次にクリープ試験の $4.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ と動的載荷試験の $4.6 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、実測値の $4.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ の $E_r(t)$ を示す。長時間載荷領域ではいずれの結果もしだいに近似し、ついには一致する。全体からみた場合、短時間載荷から長時間載荷になるにたがって各試験法の差異が少なくなる。いずれにしろ、工学的な利用面から見てほぼ同一数値を与えると見なすことができる。

この結論はきわめて重要な示唆を与えるものであり、静的試験の中にも一定ひずみを入力として荷重を検出する試験法、一定応力を入力として変位を検出する試験法、一定ひずみ速度を入力として荷重を検出する試験法等があり、まったく異なる方法であっても数学的処理を施すことによって動的性状と静的性状が関係づけられ、ほぼ近似した $E_r(t)$ が得られるという興味ある結果が得られた。

(2) 特性温度 (T_s)

基準温度 T_0 の選択は任意であるが、シフトファクター $\log a_T$ と温度の関係をプロットした場合、物質ごとに勾配が異なってくる。これらについて Williams, Landel, Ferry らは特性温度、 T_s を導入することによって、すべての物質の a_T と温度の関係を1つの一般式で表現できることを明らかにした^{15), 16)}。

本研究で得られた各試験法の a_T と温度の関係(図-9 参照)から T_s を求めてみると、試験法によって若干異なるが絶対温度表示で $325(\pm 1)^{\circ}\text{K}$ であった。図-10 の実線は種々の高分子物質の $\log a_T$ vs. $T-T_s$ 曲線を示すものであり、エポキシアスファルト混合物はこの種の材料とほぼ似たレオロジー挙動を示すと結論される。

なお、図-10 には、アスファルト混合物に同一条件で応力緩和試験を行い、換算変数法の適用の結果得られ

図-9 応力緩和試験、動的載荷試験、クリープ試験、定ひずみ速度試験からそれぞれ求めた緩和弾性率のマスターカーブおよびシフトファクターと温度の関係

図—10 シフトファクター vs. $T-T_s$ 曲線

た $\log a_T$ vs. $T-T_s$ の関係も併記したが、説明は 6. (4) にゆずる。

6. エポキシアスファルト混合物の応力緩和

(1) エポキシアスファルト混合物の応力緩和性状

図—9 に示した混合物の緩和弾性率と载荷時間の関係を示すマスターカーブは、一定ひずみを入力としたときの出力として得られる応力との比をもって定義される $E_r(t)$ と载荷時間の関係を示す図であるが、単位ひずみを入力として考えた場合には縦軸は応力を示すことになり、結局、図—9 は単位ひずみを入力としたときの応力と载荷時間の関係を示すマスターカーブと考えられる。したがって、短時間载荷領域（低温領域に対応する）から長時間载荷領域（高温領域に対応する）になるにしたがって応力が減少（緩和）するが、その割合（単位時間あたりの応力緩和）は短い载荷時間でもっとも著しい。

(2) 材料の緩和性状の評価法

実験の結果得られた混合物の応力緩和性状の評価方法について考えてみるに、前述したように緩和弾性率のマスターカーブを単位ひずみを入力した場合の応力と載

荷時間の関係としてとらえる方法、図—8 のように温度ごとにマスターカーブを書きノモグラムの使用する方法、シフトファクター vs. 温度をパラメーターとしてとらえる方法等のほかに緩和挙動をおおまかに把握する方法として示性緩和時間 $K(T)$ を利用する方法、応力半減期の概念を利用する方法等が考えられる。

示性緩和時間は $E_r(t)$ が、

$$\log E_r(t) = 1/2(\log E_1 + \log E_2)$$

になるまでの時間であると定義される。ここで、 E_1 はガラス状態域における弾性率、 E_2 はゴム状高原域における弾性率を意味する。 $K(T)$ をパラメーターとして利用する場合、 E_1 の時間決定に若干の誤差を含むこと、混合物の $E_r(t)$ がしだいに下限値に近づきゴム状高原域になるまでの測定が不可能なため、かなりの誤差を含む E_2 を示す時間しかとれない等の理由から、 $K(T)$ は 1 つのめやすを示すパラメーターであると考えたい。

そこで、筆者らはより簡便な方法として E_1 だけを利用する応力半減期を定義する。これは $\log E_r(t)$ (あるいは応力) が $1/2$ になるまでの時間として定義される。アスファルト混合物の力学挙動のようにゴム状高原域まで現時点では測定が不可能な場合にも有効なパラメーターの 1 つであるが、いずれにしても、 $K(T)$ や半減期の考え方は物性論的に考えるならば、1 つのめやすでしかありえないが、工学的見地からすれば、材料の相対比較の目的には十分利用が可能であろう。

(3) シフトファクターと温度との関係

主として経験的手法から発展したシフトファクターの概念^{(15), (18), (19)} は材料のレオロジー解析に有効な方法として利用されているが、その物理的意味の考察は十分にはなされていない。温度をパラメーターとして時間軸に平行に材料の力学挙動（たとえば $E_r(t)$ ）をシフトした場合、 $\log a_T$ vs. 温度曲線は測定温度ごとの T_g からのシフト量を意味し、任意温度における $E_r(t)$ は基準温度の $\log a_T$ 倍だけ時間軸に平行に移動することになる（図—8 参照）。

先に定義した応力半減期ごとの変化量はシフト量と同じになりシフトファクターのもつ物理的意味の 1 つは緩和時間と温度の関係にあると説明されよう。この事実は応力半減期のみで成立するのではなく、応力が任意の量になる時間を温度ごとに比較した場合、図—8 から明らかなようにやはり基準温度からのシフトファクターと同じになるはずである。すなわち、任意温度における緩和性状は基準温度のそれとの比（シフト量）によって表現されることになる。

(4) アスファルト混合物の緩和性状との比較

同一の粒度配合、バインダー量、試験条件で行ったエポキシアスファルト混合物とアスファルト混合物の $E_r(t)$ のマスターカーブと载荷時間の関係、およびシフトファクターと温度の関係を 図-11 に示す。 $E_r(t)$ はエポキシアスファルト混合物の方が大きく、また、载荷時間依存性が小さい。 図-11 を単位ひずみを入力とした場合の応力と载荷時間の関係としてとらえた場合、アスファルト混合物に比較してエポキシアスファルト混合物はより緩和しにくい混合物であり、また、各温度におけるシフトファクターが大きいことからエポキシアスファルト混合物の方がアスファルト混合物より緩和時間の温度による変化がかなり大きいことがわかる。換言すれば、任意の温度変化 ΔT による緩和性状の変化を载荷時間の変化 dt で生じさせるためには、エポキシアスファルト混合物の方がより大きい dt を必要とすることになる。たとえば、両混合物について、 10^4 kg/cm^2 の $E_r(t)$ を示す時間を 0°C 、 20°C についてシフトファクターから計算すると、アスファルト混合物ではそれぞれ約 2.5×10^2 秒、 1.7×10^{-1} 秒になるのに対し、エポキシアスファルト混合物ではそれぞれ約 1.8×10^4 秒、 4.2×10^6 秒になる。エポキシアスファルト混合物はアスファルト混合物より応力の緩和が遅く、低温になるにしたがってますますその傾向を著しくする。この事実は概説で指摘したように温度応力を考える場合にきわめて重要な意味をも

図-11 エポキシアスファルト混合物とアスファルト混合物の緩和弾性率の比較 ($T_0=20^\circ\text{C}$)

図-12 エポキシアスファルト混合物とアスファルト混合物の緩和弾性率の比較 ($T_0=0^\circ\text{C}$)

つ、低温時における両混合物の応力緩和性状の差異をさらに明らかにするために 0°C における $E_r(t)$ のマスターカーブを 図-12 に示す。

応力緩和が大きい（速い）ということは変形しやすい力学挙動と対応するものであり、たとえば完全に応力が緩和した場合、与えたひずみが永久変形として残ることになる。このことは、与えたひずみを 1 (100%) とした場合にひずみと応力の積は単位体積あたりのエネルギーになるので $E_r(t)$ vs. 時間曲線はとりもなおさず位置エネルギーが他のエネルギー（たとえば熱エネルギー）に変換する時間的推移を示すものと考えられる。図-11、12 からアスファルト混合物はエポキシアスファルト混合物に比較して変形しやすい（応力が緩和しやすい）という挙動を介してより速いエネルギー変換をする混合物であるといえよう。したがって、材料の開発や混合物の設計等の工学的応用を考える場合には、弾性率の高いエポキシアスファルト混合物は高温側での安定性等にすぐれている反面、低温側における $E_r(t)$ が大きくかつ応力緩和が遅いことからアスファルト混合物より大きい残留応力を示すことになり、温度応力、あるいは温度応力と外力（走行荷重）の組み合わせによる混合物の亀裂が入る可能性もしくはくりかえしによる熱疲労による破壊のおそれも考えられよう。これらは材料性状からみた考え方であり、より具体的な計算には温度勾配や周期を含む舗装体の温度変化と時間の関係、混合物の熱膨張係数、舗装体の伸びを検討するための载荷時間と設定温度の問題、混合物がおかれる下層との接着やメンブレンの評価の問題等を解決する必要がある、舗装体の構造からみた力学性状に関するテーマとして別途検討を要しよう。

7. 結 論

エポキシアスファルト混合物に応力緩和試験、動的载荷試験、定ひずみ速度試験、クリープ試験を行った結果明らかになったことがらに次に列記するとおりである。

(1) 载荷時間と温度を変えて行った動的载荷試験、定ひずみ速度試験、クリープ試験の結果の数学的处理によってそれぞれ $E_r(t)$ を求めたが、応力緩和試験による実測の $E_r(t)$ とほぼ同じ $E_r(t)$ がそれぞれ求められた。

(2) シフトファクター vs. 温度曲線もほとんど近似しており、したがって、ほぼ同様の T_s が明らかにされたが、他の高分子材料にもよくあてはまる $\log a_T$ vs. $(T-T_s)$ 曲線に本混合物の $\log a_T$ vs. 温度曲線が合致した。

(3) $E_r(t)$ と载荷時間の関係は単位ひずみを入力とした場合の応力の時間的変化（応力緩和）を示すことに

なり、混合物の緩和性状がきわめてよく理解される。

(4) アスファルト混合物はエポキシアスファルト混合物に比較して応力緩和が速い。

(5) この事実は、エポキシアスファルト混合物は低温時における応力緩和が小さいので残留応力が大きいことを意味するものであり、これによる亀裂、あるいは走行荷重による応力と合成された場合の亀裂に対する検討が必要とされる。

(6) $\log a_T$ vs. 温度曲線は緩和時間の温度による変化を示す物理的意味をもつことを考察した。この結果を用いることにより従来十分の検討が行われなかったこの種材料の一つの評価法が生まれる。

8. 後 記

エポキシアスファルト混合物の基礎的力学挙動について各種の実験研究を行い、緩和弾性率を介して混合物の応力緩和性状を論じた。現在舗装材料としてもっとも多く利用されているアスファルトセメントに比較して高価であることから経済性の問題を検討する必要はいうまでもなく、さらに施工性、疲労性状、劣化性状等についてなお論議しなければなるまい。

エポキシアスファルト混合物に関する筆者等の一連の研究成果によればかなりすぐれた力学挙動を示し、セメントコンクリートとアスファルトコンクリートの補完材料的力学性状をもつようである。たとえば先に論じたようにアスファルト混合物に比較して変形しづらい性状をもつが、このことはエポキシアスファルト混合物がより緩和しにくい一面をもつものであり、特に低温領域においては緩和弾性率が大きく、かつ応力の緩和が遅いので大きな残留応力をもつことになり、熱ひずみや熱応力およびそれらのくりかえしへの順応性が危惧される。温度応力を論ずる場合のファクターの一つである温度変化 ΔT をとってみても、高温側における ΔT なのか低温側

における ΔT なのか、その変化の勾配、そして同じ ΔT でも温度上昇なのか温度下降なのか種々の場合が考えられる。より具体的に論ずるためにフィールドにおける温度記録や舗装体の伸びを測定する必要がある。これらの研究成果については後日の発表を予定している。

本研究は、北海道工業大学瀝青材料研究室で行われたものであり、研究成果の討議に北海道大学工学部 笠原篤助手の助言をいただいた。関係各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- 1) 伊吹山四郎：舗装，第10巻，第1号，p. 7, 1975.
- 2) 谷口邦夫ほか：第12回日本道路会議論文集，p. 323, 1975.
- 3) 伊吹山四郎ほか：施工技術，第9巻第1号，p. 65, 1976.
- 4) 間山正一・菅原照雄：土木学会論文報告集，250号，p. 111, 1976.
- 5) 間山正一：石油学会誌，第19巻，第11号，p. 19, 1976.
- 6) 間山正一ほか：第7回石油化学討論会予稿集，p. 37, 1976.
- 7) 間山正一ほか：同上 p. 41, 1976.
- 8) 間山正一：石油学会誌，第21巻，第1号，p. 68, 1978.
- 9) 間山正一・佐川一行ほか：土木学会北海道支部論文報告集，第33巻，p. 317, 1977.
- 10) 山崎泰三郎・森吉満助：土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，第5部，p. 277, 1975.
- 11) 間山正一・佐川一行：土木学会第32回年次学術講演会講演概要集，第5部，p. 366, 1977.
- 12) Secor, K.E., C.L. Monismith: Transactions of the Society of Rheology VIII, p. 19, 1964.
- 13) 笠原 篤・菅原照雄：土木学会論文報告集，第215号，p. 75, 1973.
- 14) Ninomiya, K., J.D. Ferry, : Jour. Colloid Sci., Vol. 14, p. 36, 1959.
- 15) Ferry, J.D. : 高分子の粘弾性，東京化学同人，p. 67, 1959.
- 16) A.S.T.M. : Designation, D 790-71, 285, 1971.
- 17) I.L. Hopkins, R.W. Hamming : Jour. Appl. Phys., Vol. 28, No. 8, p. 906, 1957.
- 18) 小野木重治：レオロジー要論，棋書店，p. 155, 1967.
- 19) Williams, M.L. : Jour. Phys. Chem., Vol. 59, p. 95, 1955.

(1977.10.6・受付)