

エポキシ樹脂混合物の応力緩和挙動

- 主としてエポキシアスファルト混合物との性状比較 -

北海道工業大学 工学部 正会員 間山 正一
 谷 組 (株) " 保原 英男
 北海道工業大学 工学部 学生会員 泉 真志夫
 森谷 幸久

1. 概説

アスファルト、エポキシアスファルト、エポキシ樹脂等の瀝青材料系バインダーと骨材の混合からなる瀝青材料混合物を舗装に利用する場合に必要な力学的性質として、破壊性状、変形係数、変形特性、疲労性状等があげられ、舗装の力学的挙動における、それぞれの意義が論じられている¹⁾。筆者等は、アスファルト混合物の他に、エポキシアスファルト混合物(エポキシ樹脂、アスファルトを添加した硬化剤、骨材の混合をいう)、エポキシ樹脂混合物(エポキシ樹脂、硬化剤、添加剤、骨材の混合をいう)の力学的特性に関して一連の実験研究を行ない、各種の論文の発表をしているが^{2),3),4)}、ここではエポキシ樹脂混合物の応力緩和性状について論じた。エポキシ樹脂混合物の用途を想定した場合、経済性、施工性の観点からモルタル配合がその大半であり、また若干の施工実績をもっている。本論文で密粒度アスファルトコンクリートの配合に順じて配合をとっているのは、同一粒度配合、同一バインダー量(5.8%)でバインダーを変えた混合物の応力緩和性状を明確に検討するためである。

2. 応力緩和性状を検討する意義について

混合物の力学性状を検討する場合に必要な力学的性質は前述した4つの性質について多くの成果が発表されているが、筆者等がここで応力緩和性状を特に論ずるのは、主として長時間載荷領域およびこれに対応する高温領域における変形係数(層弾性理論解析による荷重分散性能を支配する一因子といわれている)として従来論じられてきた緩和弾性率(応力とひずみの比で定義される)を単位ひずみを入力としたときの応力の時間的減少(応力緩和)を示すものとして捉え、湿度変化によつて生ずる湿度応力に対する安全性を検討するためである。アスファルト混合物に比較して、より強度が大きく、変形係数の大きいエポキシ樹脂混合物は従来の評価方法によれば、"すぐれた舗装材料"とされるが、反面、応力緩和が遅く、緩和しきれないことによつて残留応力が疲壊を誘因する恐れがあり、また、そのくりかえしによる熱疲労、あるいは車両荷重による応力と合成されたときに生ずる破壊等が懸念される。本論文においては、あるひずみを入力としたときに応力の緩和現象を直接測定できる応力緩和試験を行ない、基礎的材料性状の観点から、これらの点を検討したい、なお、試験法、試験装置等については本論文報告集でおおに説明した。

3. バインダー成分、骨材の粒度配合、供試体作製法 表-1は本研究に使用したエポキシ樹脂バインダーの成分と配合を示す。ここで、ポリアミド樹脂は硬化剤、トリス(ジメチルアミノメチル)フェールは硬化促進剤、ベンジルアルコールは希釈剤として使用した。なお、バインダーの熱変形温度(H. D. T.)は42℃である。

表-1 バインダーの成分と配合

Binder component	Component A	Component B
Bisphenol A type epoxy resin	80	
Benzyl alcohol	20	
Polyamide resin		45
Tris(dimethyl aminomethyl)phenol		5

表-2は骨材の粒度配合（密粒度アスファルトコンクリート配合を参照）を示し、バインダー量は5.8%とした。

供試体の作製方法でアスファルト混合物やエポキシアスファルト混合物と大きく異なる点は加熱を要しない、常温混合、常温輾圧の方法をとる点である。すなわち、20°Cに保たれた各種のバインダー成分を混合してバインダーを作製し、これと同温度に保たれた骨材とをミキサで充分混合して型枠に流し込み、ローコンパクタによる24トラバースの輾圧によってエポキシ樹脂混合物を作製する。熱硬化性樹脂は、その後の養生温度によって力学性状が異なるが、本論文においては、20°C、14日間の養生後、ダイヤモンドカッターで供試体を切り出した。

表-2 骨材の粒度配合

Sieve 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 (%)	

4. 実験結果と考察

動的載荷試験の矩形波を利用し、一定ひずみ、 $7, 28 \times 10^{-4}$ を入力としたとき、時間の関数として検出される応力は時間の経過とともに減少するが、これはとりもなおさず応力緩和性状を示すものである。ここでは、ひずみと応力の比として緩和弾性率、 $E_r(t)$ 、を定義し、温度および載荷時間へのレスポンスとして $E_r(t)$ をとらえた。

図-1は、温度をパラメーターにして $E_r(t)$ と載荷時間の関係を示した図である。高温になるほど、また載荷時間が長いほど $E_r(t)$ が減少し、60°C、 10^3 秒は近の載荷時間でほぼ下限値と思われる 6×10^3 (kg/cm^2) の $E_r(t)$ を示した。低温側では $E_r(t)$ が大きくなり、10°C、 10^0 秒付近の載荷時間で、ほぼ上限値と見られる 1.6×10^5 (kg/cm^2) の $E_r(t)$ が得られた。上限値が得られる挙動は舗装用混合物として広く使用されているアスファルト混合物でも同じであり、上限値として約 1.2×10^5 (kg/cm^2) の $E_r(t)$ が得られているが、下限値までを実測に測定することは多くの場合、不可能に近く、本混合物においてこの挙動を把握したことの意義は大きい。すなわち、本混合物は応力の緩和が著しく遅く、また緩和しきれない挙動（下限値をもつ点）を示すといえる。

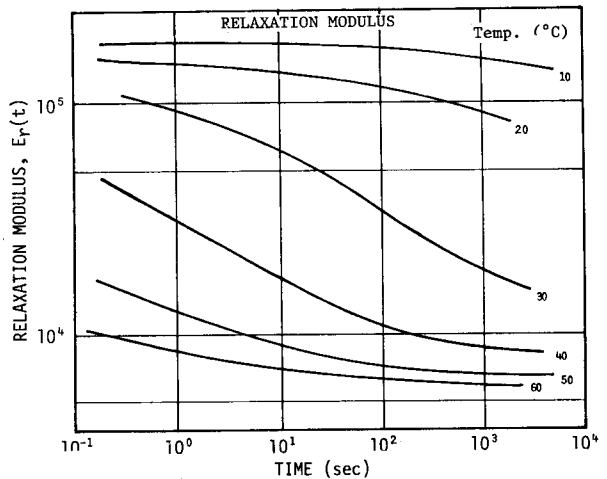


図-1 緩和弾性率と載荷時間の関係

この種混合物の挙動解析に使われる時間・温度重ね合せの原理を適用して得られたのが図-2に示す $E_r(t)$ のマスターカーブ、およびシフトファクター、 $\log a_T$ 、と温度の関係である。基準温度、 T_0 、を20°Cにとった時に得られたマスターカーブを図-2に示したが、他の温度におけるマスターカーブは、20°C以外の温度を T_0 にとって描くが、 $\log a_T$ と温度の関係から描くことができることは言うまでもない。低温側および高温側にそれぞれ対応する短時間載荷領域および長時間領域で上・下限値をもつマスターカーブをみた場合、30°C~40°Cの温度範囲に対応する $10^0 \sim 10^7$ 秒の載荷時間でその依存性が大きいことがわかる。この解釈は、図-1および図-2に示す $E_r(t)$ と載荷時間の関係の単純勾配をこえた場合であり、毎秒あたりの $E_r(t)$ の減少（応力緩和）は短時間載荷領域で急激に生ずることに注意しなければならない。すなわち、任意温度における応力緩和はひ

ずみを入力とした直後に急激に緩和し、その後応力の緩和は緩くが時間あたりの緩和（緩和速度）はしだいに小さくなる。

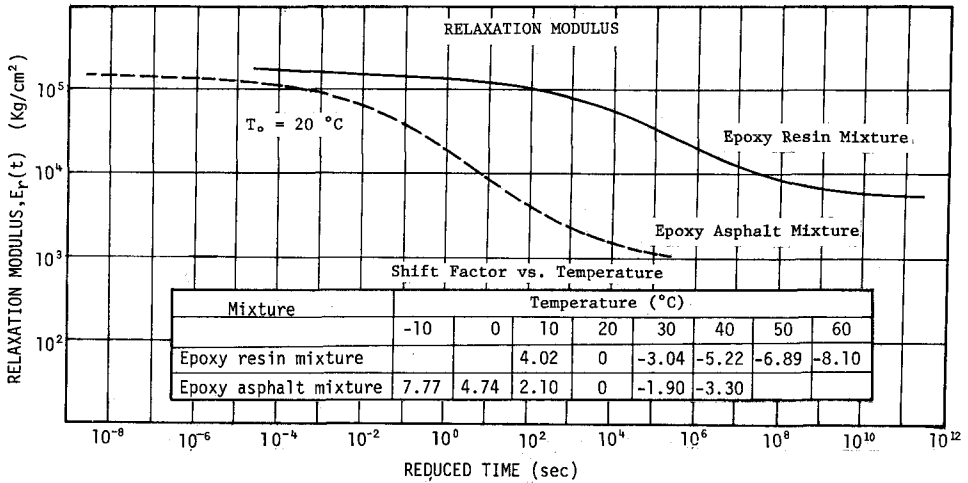


図-2 緩和弾性率のマスターカーブ

図-2にはエポキシ樹脂混合物の応力緩和挙動をより明確にするために、エポキシアスファルト混合物について同一粒度配合，同一バインダー量，同一試験条件で行なった結果を併記した。エポキシアスファルト混合物はアスファルトを添加した硬化剤とエポキシ樹脂および骨材との混合によって得られる混合物であるが，この詳細についてはすでに本論文報告集²⁾その他で報告済みである。

エポキシ樹脂混合物とエポキシアスファルト混合物の $E_r(t)$ を比較した場合，ほぼ上限値と思われる $E_r(t)$ ($1.2 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^5$ kg/cm²)をもちことは共通するが，載荷時間依存性は極端に異なる。エポキシアスファルト混合物は長時間載荷になるにしたがって $E_r(t)$ が減少し，約 10^5 秒で 10^3 kg/cm²の $E_r(t)$ になり，しだいに下限値に近づくのに対し，エポキシ樹脂混合物は約 5×10^7 秒で 10^4 kg/cm²の $E_r(t)$ をもちしだいに下限値に近づいている。おおまかな見方をすれば，下限値はエポキシ樹脂混合物はエポキシアスファルト混合物の約10倍の $E_r(t)$ であり，前者の $E_r(t)$ の載荷時間依存性がきわめて遅いことが理解できる。

この事実はエポキシ樹脂混合物の応力緩和がエポキシアスファルト混合物のそれと比較して，きわめて遅いことを意味する。応力緩和試験の定義にもとづいて考察するならば，任意のひずみを入力したときの応力の減少の時間的変化（応力緩和）を求めることにあり，もし完全に応力が減少するならば与えたひずみは永久変形として残ることになる。したがって，応力の緩和とはひずみという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）に変換される過程を示すことであり，エポキシ樹脂混合物はエネルギー変換のきわめて遅い混合物といえる。応力緩和試験と表裏の関係にあるひずみ緩和試験（クリープ試験）においてもエポキシ樹脂混合物が荷重（応力）のひずみへの変換が遅いことが予測され，変形抵抗の大きい材料であるといえよう。クリープ試験で定義づけられるクリープコンプライアンス， $J(t)$ は変形係数の1つであるクリープ弾性率， $E_c(t)$ ，の逆数であり，また $E_r(t)$ も変形係数の1つであることから，結局，応力緩和の遅い材料（混合物）は変形しづらい材料といえる。このことはこの種の混合物の力学的状態を考察する場合に，きわめて重要である。

舗装材料に求められる力学的性質は種々あるが，それらの1つに変形抵抗性があることは言うまでもない。

その観点からすれば、エポキシ樹脂混合物はきわめてすぐれた舗装材料といえる。また種々の仮定を含みながらも弾性理論によると弾性係数比の大小は荷重分散性能を支配し、表層材料の弾性係数が重要な因子となることが知られている。ここで定義される弾性係数を任意温度、任意載荷時間における変形係数と考えるならば、混合物の変形係数は舗装構造面からみた場合、荷重分散性能を支配する重要な力学的性質であり、エポキシ樹脂混合物が評価される点でもある。しかし、この種混合物に要求される力学的性質の1つに温度応力に対する抵抗性、いわゆる Non-Traffic Cracking の問題を考慮する必要があり、従来ともすれば評価されない分野であったことはいなめない。温度応力を求める場合に必要とされる因子は、温度変化、温度勾配、混合物の線膨張係数、応力緩和性状、メンブレンを含む下面との接着状態等があげられる。温度を変化させて時間の関数として応力緩和性状を論ずる意義は上記の種々の因子からも理解される。

変形係数が大きく、変形抵抗の大きいエポキシ樹脂混合物の力学的性質を論ずる場合に温度応力の観点から応力緩和性状をみた場合、応力緩和がきわめて遅いことが問題となり、熱疲労、車両走行荷重と合成された場合の破壊を検討する必要があろう。

これらは材料性状の観点からの見解であり、別途、構造面からの解析を要しよう。筆者等は線膨張係数の測定も行っており、“シームレス舗装”あるいは“目地無舗装”としてのこの種混合物の実用の可能性を検討する場合に、これらの力学的性質を検討し、構造解析への入力とした。

5. 結 論

1) エポキシ樹脂混合物の応力緩和性状を把握するために、動的載荷試験の矩形波を利用して、実用性状を十分に網羅する温度および載荷時間領域にわたって応力緩和試験を行なった。

2) その結果、温度と載荷時間に依存する緩和弾性率が明らかにされた。

3) 緩和弾性率はひずみを入力した直後に急激に小さくなり、その後徐々に減少して約 10^{12} 秒付近ではほぼ下限値と思われる 5×10^3 kg/cm を得た。

4) このことは応力緩和がきわめて遅いことを意味し、また、ほぼ下限値をもつということは緩和しきれない力学的性質を示すことが明らかにされた。

5) 材料の力学挙動から評価した場合に、下層面と完全に接着されているならば、常に温度応力を生じていることになり、接着層、あるいはメンブレンの研究の重要性を示唆するものといえる。

6) エポキシアスファルト混合物は、従来舗装材料として最も広く使用されているアスファルト混合物に比較して緩和しにくい材料であるが、エポキシ樹脂混合物より、ほるかに緩和し易い混合物であることが明らかにされた。

最後に、本実験研究は北海道工業大学工学部間山研究室で行なわれたものであり、筆者等と本学学生佐藤秀二君とが実験を行なったものを筆者等がとりまとめたものである。関係各位に厚く謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 間山正一、石油学会誌、第19巻第11号、1976
- 2) 間山正一、菅原照雄：土木学会論文報告集、第250号、1976
- 3) 間山正一；石油学会論文誌、Vol. 21, No. 1, 1978
- 4) 間山正一、佐川一行：土木学会北海道支部論文報告集、第33号、1977
- 5) 山内幸夫、間山正一、佐藤秀二：土木学会第32回年次学術講演会講演概要集、第5部、1977