

エポキシ樹脂混合物の動的応答に関する一考察

北海道工業大学 正員 〇小山 泥舟
 " 学生員 飯沢 正博
 " " 石井 徹
 " 正員 間込 正一

1. 概説

近年、新しい舗装材料としてエポキシ樹脂を基材とする材料が注目され、重交通の舗装や橋面舗装の材料に実用化されている。筆者等は舗装材料としてのエポキシ樹脂バインダー（樹脂、硬化剤、添加剤の混合をいう）およびエポキシ樹脂混合物（バインダーと骨材の混合をいう）の基礎的力学性状の実験・研究を実施中であるが^{1,2)}、本論文においては樹脂（主剤）、硬化剤および熱変形温度の異なる2種のエポキシ樹脂混合物（以下、混合物という）についてひずみ制御方式による動的応答を試み、主として変形係数に注目してその力学挙動性状を明らかにしたい。

2. 実験材料および使用機器

表-1に2種類のバインダーの成分とそれぞれの配合（A配合とP配合とする）、表-2に骨材（珪砂）の粒度配合と比重を示す。なお、バインダー：珪砂の配合重量比は1：4（バインダー量20%）である。供試体の作成は室温（18～20℃）で手練りしたのち、型枠に流し込み、コテ仕上げをして23℃、3週間養生とした。コテ仕上げによって得られた供試体の空隙率はばらつきが多いので、18～21%のものを選んで試験に用いた。

次に実験は写真-1に示す108型ダイナミックサイクラー（米国インストロン社製）を使用した。

機能としては

- 試験法：動的・曲げ・引張圧縮・剪断
静的・曲げ・引張・圧縮・剪断
- 制御方式：ひずみおよび応力両方からの油圧サーボ制御方式
- 波形：正弦波・三角波・矩形波・ランプ
- 最大許容荷重：±5000 Kg
- 周波数：正弦波で0.01～30 Hz ランプを利用した静的載荷速度は最大8 mm/sec まで可能
- 最大変位振幅：±50 mm

なお、温度制御は-60℃～200℃と0.25℃

表-1 バインダーの成分と配合

配合	成 分	主剤	硬化剤
A配合	ビスフェノールA型ジグリシエーテル	70	—
	ビスフェノールA変性ジグリシエーテル	30	—
	変性脂肪族アミン	—	25
P配合	ビスフェノールA型エポキシ樹脂	80	—
	ペンシリアルアルコール	20	—
	ポリマド樹脂	—	45
	トリス（ジメチルアミノ）フェニール	—	5
熱変形温度(H.D.T)：A配合=42℃、P配合=58℃			

ここで熱変形温度(H.D.T)とは試験片に一定荷重を加えて温度を上昇させ、0.254 mm のたわみを生ずる時の温度をいう

表-2 骨材の粒度配合

骨材粒度 mm	通過重量百分率 %	比重
1.2	100	2.516
0.6	55	2.499
0.3	15	2.467
0.15	0	

が可能な空気槽を使用した。

3. 試験法および解析法

供試体が所定温度に達した後、正弦的に変化する引張・圧縮ひずみを入力とし(図-1)、その時の動的応答として応力(荷重)と位相角を得る。これらのデータから複素弾性率、動的弾性率、損失弾性率、損失正接、複素粘性率、等の各種動的性状を得るが本論文においては、変形係数(ステイフネス)カーブである複素弾性率、 $|E^*|$ に注目して論ずる。なお、試験条件は実際に舗装材料がおかれている環境条件を十分に模擬すると思われる範囲、すなわち周波数 $f = 0.01 \sim 10 \text{ Hz}$ (載荷時間 t に換算して $15.9 \sim 0.016 \text{ 秒}$)、温度は $20 \sim 80^\circ \text{C}$ の範囲、設定ひずみは $1.5 \times 10^{-4} (\%)$ および $3.0 \times 10^{-4} (\%)$ の2種で実験を行なった。

計算式は以下の式によった。

$$\sigma = \frac{P}{ab}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

a : 供試体の奥行 (cm)
 b : 供試体の幅 (cm)
 P : 荷重 (kg)
 l : スパン (cm)
 Δl : 変位 (cm)

なお、載荷部の詳細図を図-1に示す。

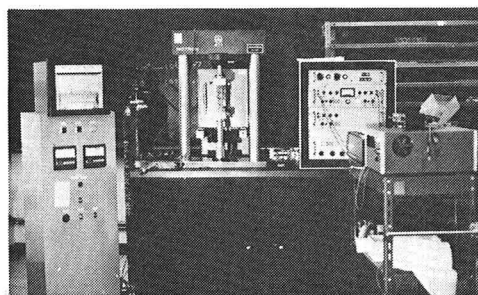


写真-1 108型ダイニングサイクラの全体図

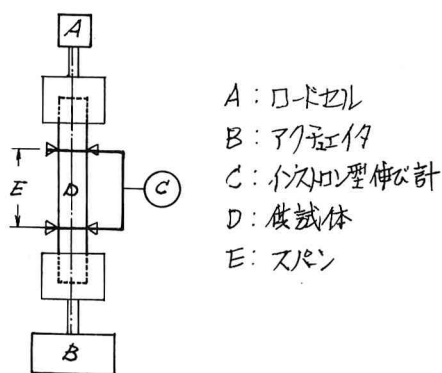


図-1 載荷部

4. 実験結果

載荷周波数および温度をかえた実験から得られた結果のうち、A配合の複素弾性率を図-2に、P配合の複素弾性率を図-3に、載荷時間の関数としてそれぞれ示す。

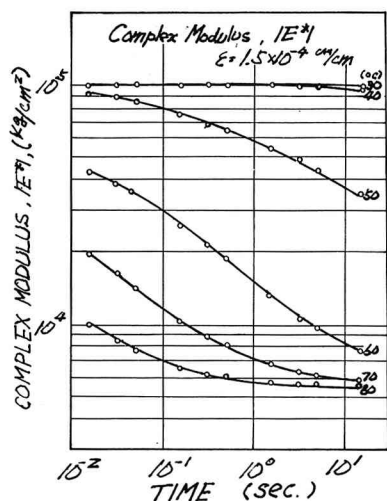


図-2 A配合の $|E^*|$ と載荷時間の関係

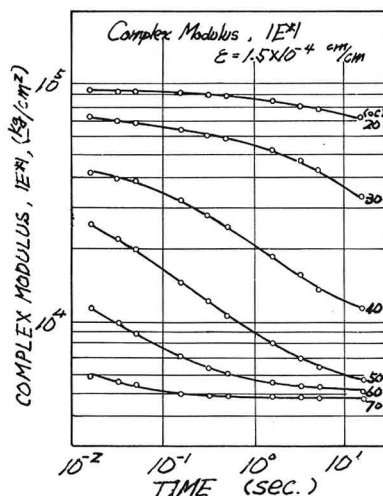


図-3 P配合の $|E^*|$ と載荷時間の関係

温度と時間の関数として得られた各種動的性状に換算変数法（時間・温度重ね合せの原理）が適用できることはすでに筆者等が確認しているため⁽²⁾、図-2と図-3に示した複素弾性率にこの手法を適用する。その結果、図-4に示すようなマスターカーブと図-5に示すようなシフトファクタが得られた。

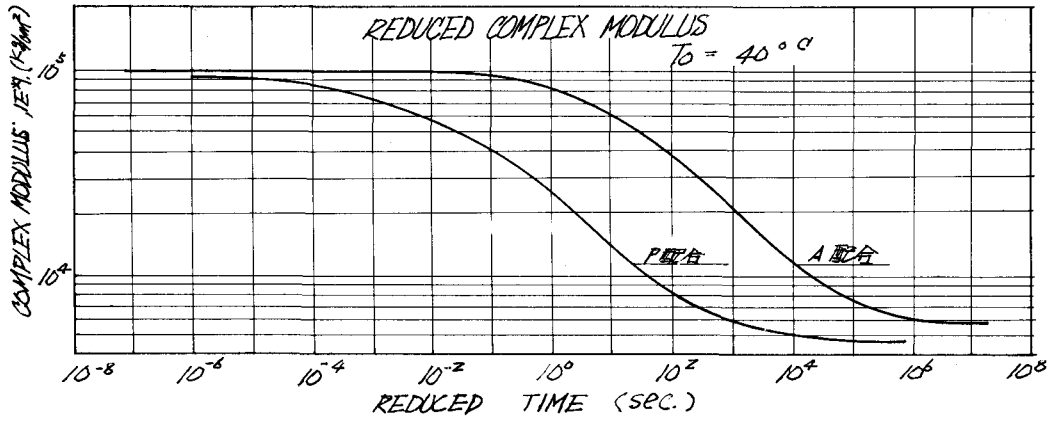


図-4 $|E^*|$ と载荷時間の関係を示すマスターカーブ ($T_0 = 40^\circ\text{C}$)

5. 考察および結論

図-2および図-3に示した複素弾性率は与えたひずみが $1.5 \times 10^{-4} (\text{cm/cm})$ の場合であるが、このひずみの2倍にあたる $3.0 \times 10^{-4} (\text{cm/cm})$ のひずみを入力とした場合に得られた複素弾性率もほぼ同一であった。この事実は両ひずみ領域が線形範囲内であることを示すといえよう。

明らかに温度による弾性率の低下が観察され、特に熱変形温度付近から急激な弾性率の低下を示す。熱変形温度の定義からして当然のことといえよう。

载荷時間による複素弾性率の変化もきわめて大きい。図-2に示すA配合より図-3に示すP配合の方がより低温側で载荷時間依存性を示しているが、これはいわゆる“よりやわらかい”材料しかるに熱変形温度が低い（ 16°C の差がある）ためと思われる。

A配合はほぼ 30°C で上限値、 80°C で下限値を得た。同様にP配合はほぼ 20°C で上限値、 70°C で下限値を得た。これらの下限値を示す温度は実際の鍛造材料（鍛造体）がおかれる温度より高温であるが、下限値が得られた意義はきわめて大きく、たとえば設計への入力として意義をもつであろう。

次に時間・温度重ね合せの原理を適用して得られたマスターカーブおよびシフトファクタはそれぞれ図-4および図-5に示したが、いずれもなめらかな曲線である。このことはすでに確かめられているが換算変数法の適用の妥当性を検証するものである。

A配合については16オーダの载荷時間領域、P配合については14オーダの载荷時間領域にわたって、いずれも上・下限値をもつマスターカーブを得たが、図-5に示すシフトファクタ vs 温度曲線から基準温度 ($T_0 = 40^\circ\text{C}$) 以外の温度についても同様の曲線が描けることはいうまでもない。

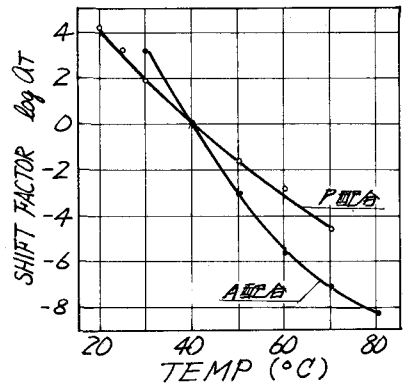


図-5 シフトファクタと温度の関係

これらの考察から次のような結論が、A配合、P配合の両配合に共通して得られる。

- (a) エポキシ樹脂と砂の混合であるエポキシ樹脂混合物に動的載荷を試みた結果、湿度および載荷時間に依存する複素弾性率を得た。高温および長時間載荷になる程複素弾性率の低下がみられる。
- (b) 1.5×10^{-4} (cm), 3.0×10^{-4} (cm) の両ひずみレベルにおいて得られた複素弾性率の値に相違はみられなかった。これは両ひずみが線形領域内にあるといえよう。
- (c) 換算変数法の適用によって広範囲の載荷時間領域にわたってなめらかな複素弾性率のカーブおよびシフトファクタが得られた。
- (d) 上・下限値をもつ複素弾性率が得られたことは設計への適用の意味からも重要である。
- (e) A配合とP配合のマスターカーブ(図-4)から同一載荷時間における複素弾性率の値は熱変形温度の高いA配合が大きい。

- 1) 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
- 2) 間山正一：引張圧縮試験によるエポキシ樹脂混合物の動的力学性状，第19回材料研究連合講演会前報集，pp. 111~112，1975
- 3) 本実験における動的載荷は5~6回の載荷からデータを取得しているので、この程度の繰り返し載荷による発熱は観察できなかった。

本実験研究は筆者等と北加昭一、鎌田博、佐川一行が行ったものであり、筆者等がこれと同一とめたことを付記する。