

# 繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の 動的性状の変化について

## CHANGES OF DYNAMIC PROPERTIES OF BITUMINOUS MIXTURES UNDER REPEATED LOADING

笠 原 篤\*・菅 原 照 雄\*\*

By Atsushi KASAHARA and Teruo SUGAWARA

### 1. 概 説

アスファルト舗装構造およびその材料としてのアスファルト混合物の動的性状ならびに疲労性状に関する研究が近年きわめて活発である<sup>1)</sup>。

アスファルト舗装の疲労問題は、あらゆる材料においてそうであるように材料の疲労現象自体が複雑なことで、また道路舗装における載荷条件、環境条件が正確に把握しがたいことなどの理由によりきわめて困難な課題とされている。従来の研究によればアスファルト舗装の破壊の要因として、材料の疲労がかなり寄与していることは明らかであり、また疲労性状に関連する因子としては舗装体に生ずるひずみ（または応力）の大きさ、構造特性（各層の厚さ、荷重分散性能、破壊に対する抵抗性など）、気象条件など多くのものがあげられ、しかもこれらの因子が複雑にからみ合っていると考えられている。これらのことからアスファルト舗装の疲労問題を総合的に論ずることはきわめて困難であるが、疲労現象をいくつかの単純な現象に分類しそのおのおのについて詳細な研究を進める必要があり、それらの集積によって研究の発展が期待されよう。

アスファルト混合物の疲労性状に関する研究は、L.W. Nijboer<sup>2)</sup>、P.S. Pell<sup>3)</sup>、R.N.J. Saal<sup>4)</sup>、C.L. Monismith<sup>5)</sup>、わが国では三浦<sup>6)</sup>など多くの研究者によって進められてきている。これらの研究の目的の多くは破壊に至るまでの繰返し載荷回数（以下、単に破壊回数という）の把握にあり、与えたひずみまたは応力の大きさとそれとの関係についてはかなり明らかにされている。すなわち、両者は金属材料におけると同様に両対数紙上において直線関係をなすことを多くの研究者が確認している。しかしアスファルト混合物の疲労特性を明らかにするために

は、単に破壊回数の把握のみならず疲労過程における力学的性状の変化を把握することも重要な課題であろう。この点に関し、C.L. Monismith<sup>7)</sup> はある回数の繰返し荷重を与えた供試体について曲げ破壊試験を行い、破壊時のスティフネスと載荷回数との関係を求め、繰返し載荷によりアスファルト混合物の破壊性状がいかなる変化を示すかを論じている。また K.D. Raitby<sup>8)</sup> ともその論文において繰返し載荷過程における力学的性状の変化について若干触れているが、詳細な検討には至っていない。

筆者らはアスファルト混合物の疲労性状を論ずるためには破壊回数のみならず、繰返し載荷を受けることにより複素弾性率 (Complex Modulus)、スティフネスなどで表現される力学的性状がいかなる変化を示し、破壊に至るかを把握する必要があると考え、繰返し載荷を受ける前、載荷過程中、破壊時において複素弾性率などの動的性状を求めることを試みた。

また筆著らは先にアスファルト混合物の破壊時のひずみについて論じ<sup>9)</sup>、単一荷重による各種の混合物の破断ひずみは  $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$  のオーダーにあることを明らかにした。また実際の道路舗装におけるアスファルト混合物で構成される層（以下、単にアスファルト層という）の下面に生ずる引張りひずみは予測される荷重に対しておおよそ  $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$  のレベルにあるものが多いとされており、一方繰返し載荷において破壊回数が  $10^2$ ~ $10^7$  回の領域にあるときのひずみは既往の研究<sup>10), 11)</sup>によれば、 $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$  のレベルにあるとされている。これらのことから車両走行に基づいて実際の道路舗装のアスファルト層に生ずるひずみは通常破断ひずみの数 % 以下、構造が弱い場合には数十 % 程度であると考えてもよいと思われる。またアスファルト層に生ずるひずみの大きさは外力を一定とした場合構造の強弱に依存するが、アスファルト層の弾性率 (スティフネス) にも大きく依存することは既往の層構造の弾性理論解析において明らかであ

\* 正会員 工博 北海道大学助手 工学部土木教室

\*\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木教室

る。これらのことから筆者らはアスファルト混合物の繰返し載荷に対する抵抗性を論ずるとき“ひずみ”を主眼におき、かつスティフネスをも考慮しなければならないと考えた。

以上、アスファルト舗装の疲労性状と舗装構造特性、ひずみ、混合物の力学的性状などとの関連性について述べたが、いずれにしる変形係数の把握がきわめて重要であると思われる。これらに基づき、本論文では、

- (a) アスファルト混合物の動的性状を論じ、
- (b) その動的性状が繰返し載荷によりいかなる変化を示すかを求め、混合物の疲労過程を明らかにし、
- (c) 動的性状と疲労性状との関係を論じようとするものである。

また本論文においてはアスファルト混合物の性状に影響を与えると予測される多くの因子のうち、内的因子として、アスファルト混合物の型およびバインダー量、外的因子として、温度ならびにひずみ量などの因子を取りあげて検討を試みた。

## 2. アスファルト混合物における $\epsilon-N$ 曲線

アスファルト舗装は一般に単一荷重により破壊されることのないように設計されており、その破壊の多くは車両走行に基づく繰返し載荷による疲労破壊である。繰返し載荷に対する抵抗性はアスファルト層に生ずるひずみの大きさにより支配され、道路舗装の寿命はそれにより大きく変化するとされている。

アスファルト混合物の繰返し載荷に対する抵抗性を求めるために、ひずみ  $\epsilon$  を  $3.5 \times 10^{-4} \sim 1.4 \times 10^{-3}$  にとり若干の実験を行った。与えるひずみ量を  $\epsilon$ 、破壊回数を  $N$  とし、通常用いられている手法すなわち  $\epsilon-N$  曲線をもってそれを表現すると 図-1, 2 が得られる。試験材料ならびに試験法などについては後に詳述する。

これらの図は過去において得られた実験結果と全く同様であり、与えるひずみ量が小となるほど、破壊回数は増大すること、またわずかのひずみ量の変化でもその回数は大きく変化することを示している。

密粒度アスファルトコンクリートに関する両者の関係は 図-1 より、ひずみ一定の場合破壊回数は  $10^5$  の幅をもった帯で示されることが明らかにされた。これは既往の研究<sup>9)</sup>と比較しておおむね妥当であると思われる。

図-2 は試験数は少ないが型の異なる3種のアスファルト混合物について温度  $10^\circ\text{C}$  における  $\epsilon-N$  曲線を描いたものであるが、その曲線は混合物の型によりかなり異なった所に位置していることが示されている。しかしこの結果はかならずしもアスファルトコンクリートにお

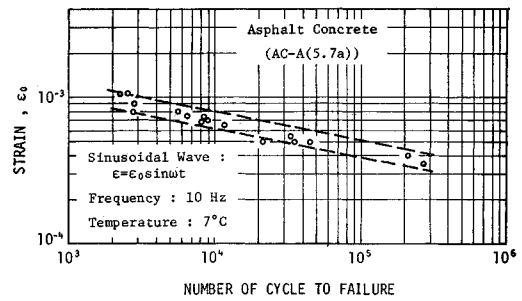


図-1 繰返し載荷におけるひずみと破壊回数との関係

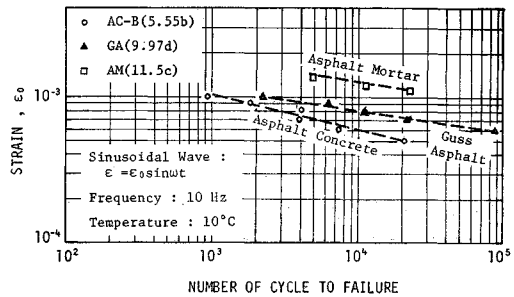


図-2 各種混合物のひずみと破壊回数との関係

いて疲労抵抗が小であり、またアスファルトモルタルは疲労抵抗が大であることを示すものではない。すなわち、この図は本研究において選択したアスファルト混合物を用いた温度  $10^\circ\text{C}$  における実験結果を示しているにすぎないからであり、おのおのの混合物はそのバインダー量ならびにバインダーの粘弾性状も異なり、温度および配合が変化すれば疲労抵抗性も大きく変化する可能性も十分に考えられる。

## 3. 実験研究の方法および試料

### (1) 実験研究の方法

#### a) 動的載荷装置

本研究に用いた動的載荷装置は舗装用材料の供試体に電気・油圧サーボ機構により、静的曲げ、動的曲げならびに繰返し曲げを行うことのできる装置であり、これらは油圧部、制御部、載荷部、記録部、温度制御部から構成されている。各部の機能の詳細については、先に筆者が発表した論文<sup>12), 13)</sup>に述べられているので、ここではそのうち主として繰返し載荷試験に関連した機能についてのみ述べる。

#### ① 機能

載荷方式：両端自由棒の4点載荷両振り曲げ  
 スパン 30 cm, 載荷点間隔 10 cm  
 供試体寸法：(a)  $4 \times 4 \times 35$  cm または

(b) 3×3×35 cm

制御方式：ひずみ制御または応力制御

波形：関数波形（正弦波，三角波，矩形波，のこぎ波），ピンボードによるプログラム波

最大許容荷重：± 500 kg

試験荷重：± 120 kg

周波数範囲：正弦波（0.1～20 Hz），矩形波（0.1～2 Hz），プログラム波（0.1～2 Hz）

ただし，いずれも最大変位における場合

最大変位：± 5 mm（供試体中央部の上下縁のひずみに換算すれば，（a）の場合  $1.4 \times 10^{-2}$ ）  
（b）の場合  $7.8 \times 10^{-3}$ ）

載荷回数表示：制御部に内蔵されたカウンタにより1サイクルにつき1回カウントする

② フィードバック機構

本装置の特色の1つであるフィードバック機構は荷重，シリンダ変位，供試体変位のおおのに付属しており，ひずみ制御ならびに応力制御の双方に用いることができる。

③ 温度制御

外部の独立した恒温装置から強制循環方式により温度管理された液体を水槽に送る。温度範囲は -20～30℃ であり，精度は ±0.1℃ である。なお温度管理についての詳細は付録に示す。

b) 実験手法

実験は動的試験ならびに繰返し載荷試験とも正弦波を入力とするひずみ制御方式で行い，与えるひずみ量は舗装体のアスファルト層下面に実際生ずると考えられるひずみ領域の上限近辺（ $10^{-4}$  のオーダー）の値を用いた。すなわち動的試験においては  $2.0 \times 10^{-4}$ ，また繰返し載荷試験においては  $3.5 \times 10^{-4} \sim 1.4 \times 10^{-3}$  のひずみで試験を行った。またひずみ  $10^{-4}$  のオーダーは過去の研究<sup>14)</sup>によれば，ほぼ完全に線形粘弾性領域と考えるとよい領域である。

ゴムで被覆された供試体をスパン 30 cm，載荷点間隔 10 cm にセットし，温度管理された恒温水槽中において動的試験は正弦的に変化するひずみ波形（ $\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t$ ）を入力とし周波数を 0.1～10 Hz まで掃引し，その応答として示される応力波形および位相角を測定する方法で行った。繰返し載荷試験は，動的試験に引続き周波数 10 Hz において正弦波を入力とし，載荷回数ごとに応力波形および位相角を測定し，破壊に至るまで逐次測定する方法で行った。

c) 解析法

一般に粘弾性体に正弦的に変化するひずみ波形（ $\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t$ ， $\omega = 2\pi f$ ）を入力とするとき，その応答として

示される応力は位相角  $\phi$  だけ位相の進んだ正弦的变化（ $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \phi)$ ， $\omega = 2\pi f$ ）を示すことは周知のとおりである。

ひずみの振幅  $\epsilon_0$ ，応力の振幅  $\sigma_0$  ならびに位相角  $\phi$  を測定することにより，その粘弾性体の動的性状を表わす諸関数を得ることができる<sup>13)</sup>。

一方，周波数を 0.1～10 Hz まで掃引し動的性状を測定する間の載荷回数は約 200 回であり，また与えるひずみも微小（ $2.0 \times 10^{-4}$ ）であることから，この 200 回の載荷期間内における動的性状の変化は実験の範囲内において見出し得なかった。また本論文でいう繰返し載荷における載荷回数は動的性状の測定終了時からの載荷回数であり，動的性状の測定中における載荷回数 200 は， $\epsilon-N$  曲線の性質からして無視することが許されると考えた。

(2) 試料

本研究に使用したバインダーの主な性状を表-1，アスファルト混合物の種類を表-2 に示す。

材料を加熱混合（2 ポアズ温度）し，40×30×6 cm の

表-1 バインダーの性状

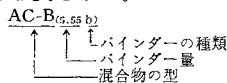
Binder	Penetration (25°C, 100 g, 5 sec)	Softening Point (T <sub>R</sub> & B., °C)	Penetration Index
a. Straight Asphalt 80/100	92	46.3	-0.6
b. Straight Asphalt 80/100	83	48.0	-0.4
c. Straight Asphalt 40/60	50	54.0	-0.3
d. Trinidad Epuré + Straight Asphalt 40/60 (1:3 by wt.)	37	58.5	+0.1

表-2 アスファルト混合物の種類ならびに粒度組成

Sieve Opening (mm)	Asphalt Concrete		Topeka	Rolled Asphalt RA	Asphalt Mortar AM	Guss Asphalt GA
	AC-A	AC-B	TP			
13.0	100	100		100		
10.0	83.5	93.0	100	90.0		100
7.0	74.0	77.0	85.0	55.0		85.2
5.0	65.0	70.0	80.0	46.0		70.4
2.5	47.7	50.0	70.0	46.0		55.6
1.2	35.9	40.0	58.0	46.0	100	55.4
0.6	25.0	30.0	45.0	40.0	87.0	47.0
0.3	20.5	20.0	30.0	20.0	43.5	38.4
0.15	14.5	10.6	12.8	6.7	14.7	38.4
0.074	7.0	6.2	7.9	6.3	12.5	38.4
Binder	a	b	b	c	c	d
Binder%		4.55	6.25	4.75	10.5	
	5.7*	5.55*	7.25*	5.75*	11.5	9.97
		6.55	8.25	6.75	12.5	

\* 最適アスファルト量 (O.A.C.)

(注) 本研究において用いた混合物の種類が多いことから以下に示すような略号を用いた。



鋼製型枠内でローラコンパクトで転圧（30ポアズ温度）し、かつホイールトラッキング試験機を用い 45℃において約1時間トラバースをかけニーディング作用を与えた試料ブロックを作製する。またグースアスファルトに関しては、温度約 220℃のクッカで約1時間練りあげ、型枠に流し込むことにより試料ブロックを得る。供試体はこれらのブロックからダイヤモンドカッタにより切り出し、合成ゴムラテックスを塗付することにより供試体表面に薄いゴム被膜を形成せしめた6面カットの棒状供試体（寸法：4×4×35 cm）である。

#### 4. 実験結果

##### (1) 混合物の複素弾性率および損失正接

筆者らは先にアスファルト混合物の動的性状の基礎的事項について、密粒度アスファルトコンクリートを用いて検討を加えた<sup>13)</sup>。また混合物の動的性状に影響を与えると予測される種々の因子をとりあげ、それらが動的性状にかなる影響を与えるかについて考察を試みた。その結果、分散分析により混合物の複素弾性率の大きさを支配する因子は温度ならびに載荷時間であり、その寄与率の合計は約 80% になることが明らかにされた<sup>15)</sup>。しかしこれらの因子は外的因子であることから、アスファルト混合物の配合設計等に直接反映させることは困難である。

本研究においては、アスファルト混合物の配合など、

力学的性状に影響を与えると思われる種々の内的因子について、その変化が混合物の動的性状にかなる影響を与えるかを明らかにしようとするものである。ここでとりあげた因子は

- a. アスファルト混合物の型
- b. バインダー量

である。

##### a) アスファルト混合物の型の影響

アスファルト混合物はその使用目的により、骨材の最大粒径、粒度組成、バインダー量などを異にし、多くの型の混合物に分類される。

本研究においては、種々の型のアスファルト混合物がかなる動的性状を示すかを検討するために、

- a. 密粒度アスファルトコンクリート, AC-B<sub>(5.55b)</sub>
- b. トペカ, TP<sub>(7.25b)</sub>
- c. ロールドアスファルト, RA<sub>(5.75c)</sub>
- d. アスファルトモルタル, AM<sub>(11.5c)</sub>

の型の異なる4種の代表的な混合物をとりあげ、温度 -10~20℃、周波数 0.1~10 Hz においてそれらに正弦的に変化するひずみ波形 ( $\epsilon_0 = 2.0 \times 10^{-4}$ ) を与え、その応答として示される応力波形ならびに位相角を得る方法で試験を行った。その結果それらの動的性状を複素弾性率、動的弾性率、損失弾性率、損失正接、複素のび粘性率などとして求めた。なお温度をパラメーターにとり、これらの諸関数と載荷時間との関係を求めることができ、また基準温度に対しておのおののマスターカーブを描くことができることは先の論文<sup>13)</sup>において示した。

図-3 はこれらの関係のうち複素弾性率ならびに損失正接の基準温度 10℃におけるマスターカーブのみを示した。また図には各アスファルト混合物について、各温度におけるシフトファクター ( $\log a_T$ ) の値をも示している。

複素弾性率の大きさはロールドアスファルト、アスファルトコンクリート、トペカ（以上、3種はマーシャル法による最適アスファルト量の混合物である）、アスファルトモルタルの順となり、載荷時間が長時間領域になるほど混合物の型による差異は顕著となる。

損失正接の大きさは複素弾性率の場合と逆の順序となり、また長時間領域になるほど混合物

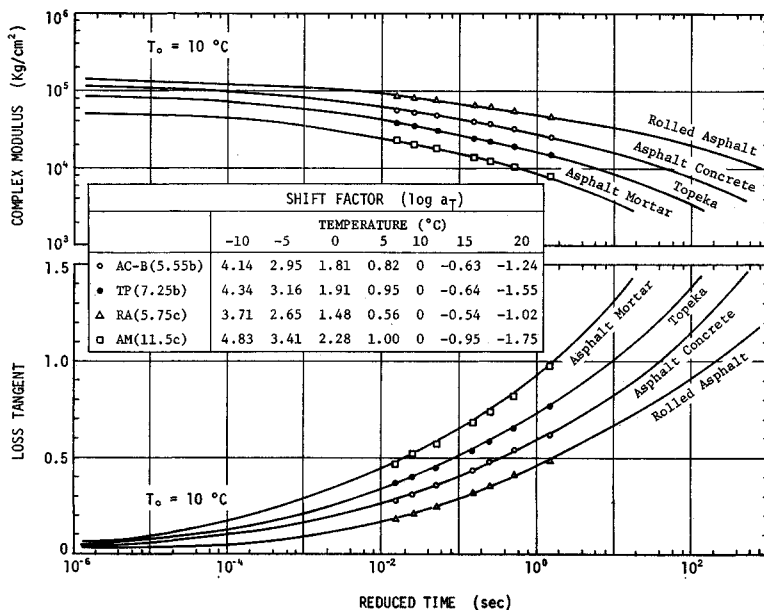


図-3 複素弾性率、損失正接のマスターカーブ

の型による差異は大となる傾向を示している。

アスファルト混合物の型による複素弾性率の差異を明らかにするために、載荷時間を  $1.6 \times 10^{-2}$  秒 (10 Hz) にとり、各温度におけるアスファルトコンクリートの複素弾性率の大きさを基準にとり、他の混合物の複素弾性率の大きさをそれとの比で表わし、その比が温度によりいかなる値をとるかを求め 図-4 を得た。なお基準としたアスファルトコンクリートの複素弾性率の大きさは、表-3 (後出) に示されている。

図より温度の上昇とともにその比はロードアスファルトの場合大となり、トペカ、アスファルトモルタルの場合小となる傾向が示されている。

① ロールドアスファルトについて

この種の混合物の外力への抵抗性はアスファルトコンクリートのように骨材のかみ合せばかりではなく、混合物としての粘度すなわち Mass Viscosity で受け持つとされている。この点からロードアスファルトに用いられるバインダーは粘度が高いものとなる。本研究において用いたバインダーはロードアスファルトに関し針入度 50、アスファルトコンクリートに関し針入度 83 のストレートアスファルトであることなどから、高温領域においてその比は大となることが説明されよう。

② トペカについて

トペカはアスファルトコンクリートに比し骨材中の細粒分が若干多いこととバインダー量が多いことなどから、アスファルトコンクリートよりその複素弾性率は小さく、温度の上昇に伴いその比は小なる傾向を示していると考えられる。

③ アスファルトモルタルについて

本研究で用いたアスファルトモルタルの配合は最大粒径を 1.2 mm とし、ロードアスファルトの 1.2 mm 以下の粒度組成と合致させ、また  $F/A$  もほぼ同一としたものである。すなわちロードアスファルトから粗骨材 (5~13 mm) を除いたものである。このことから粗骨材の除去とバインダー量の 4.25% の増加は、複素弾性率を温度  $-10^{\circ}\text{C}$  において約 50%、温度  $20^{\circ}\text{C}$  において約 67% 低下させることになる。

以上個々の混合物における複素弾性率の差について考察したが、さらにこれらに普遍性を与えるため混合物の型なるものを総括的に表わす因子として空隙を考慮した骨材体積率 ( $C_v' = C_v / (1 + \text{void})$ ) を用いて、各型の混合物の動的性状との関連性について検討を試みた。

図-5 は、載荷時間  $1.6 \times 10^{-2}$  秒、温度  $-10^{\circ}\text{C}$  および  $20^{\circ}\text{C}$  における複素弾性率ならびに損失正接と骨材体積率 ( $C_v'$ ) との関係を描いたものである。

複素弾性率と骨材体積率の関係を見るに、両者は片対数紙上において全体的にはおおそ直線関係として示さ

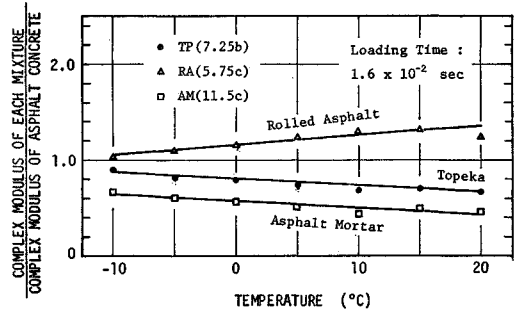


図-4 アスファルトコンクリートの複素弾性率と他の混合物のそれとの比 (縦軸) と温度の関係

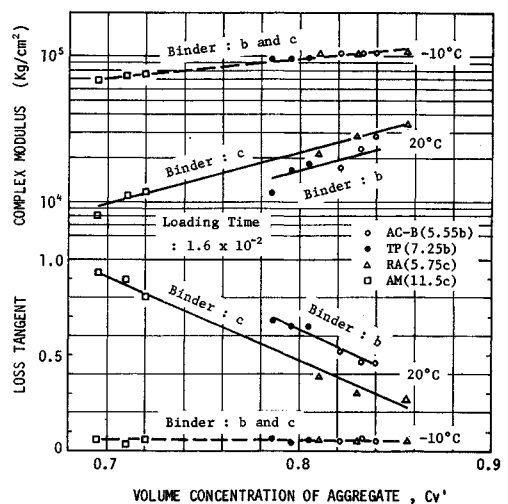


図-5 複素弾性率、損失正接と骨材体積率との関係

れ、骨材体積率の増加とともに複素弾性率は増大する傾向を示している。しかしこれを細かに眺めると、粒度が一定でバインダー量のみが異なる場合に関しては、かならずしも1つの直線では示しがたい。したがって厳密には骨材体積率と複素弾性率の関係はある幅をもつ帯として処理されるべきものであろう。また温度が両者の関係に与える影響について見るに、低温においてはバインダーの種類が異なるにもかかわらず両者の関係はほぼ1本の直線として示されるのに対し、高温においてはバインダーの種類による差が生じており、両者の関係はバインダーの種類により2本の直線として示された。すなわち同一骨材体積率において粘度の高いバインダーを用いた混合物の複素弾性率は大きな値を示している。このことは低温領域において混合物の複素弾性率は骨材体積率におおよそ支配されるが、高温領域では骨材体積率とバインダーの粘度の両方に依存することを示している。

損失正接と骨材体積率との関係を見るに、低温において損失正接は、骨材体積率に依存せずほぼ一定であり、

-10°Cにおいてその値は約0.05程度であるのに対し、高温において両者の関係は2本の直線として示され、骨材体積率の増加とともに損失正接の値は減少する傾向を示した。

以上のことより、アスファルト混合物の型による動的性状の差は、空隙を考慮した骨材体積率ならびにバインダーの粘度によっておおそ説明されると考えることができよう。

**b) バインダー量の影響**

混合物の配合設計において最も問題となる事項としてバインダー量がある。一般道路舗装用アスファルト混合物のバインダー量の決定は通常マーシャル試験により行われている。しかし混合物はその供される場所により、その目的に沿ってバインダー量を異にし、水工用および耐摩耗用混合物などにはバインダー量の多いものが用いられている。本研究では各型の混合物においてバインダー量の差がその動的性状にいかなる変化をもたらすかを求め、バインダー量の持つ意味を明らかにしようと試みた。実験に用いたアスファルト混合物は、

- a. アスファルトコンクリート (AC-B)
- b. トベカ (TP)
- c. ロールドアスファルト (RA)
- d. アスファルトモルタル (AM)

の4種であり、前3者についてはマーシャル試験により求めた最適アスファルト量 (O.A.C.) を基準とし、それより ±1% バインダー量を変化させたものを用いた。また d. については前節 ⑧ において述べたようにバインダー量はロールドアスファルトの配合から比例計算により算出したものであり、かつそれより ±1% 変化させたものを用いた。

表一3 は4種のアスファルト混合物に関しバインダー量を変化させたときの各温度における複素弾性率の数値 (載荷時間  $1.6 \times 10^{-2}$  秒における) を示したものである。

低温領域においては各アスファルト混合物についてバ

インダー量の差による複素弾性率の変化はあまり見られず、高温領域になるにしたがい、またバインダー量の増加につれて複素弾性率の大きさは減少する傾向を示している。しかしアスファルトモルタルに関しては、低温領域においても若干の変化が見られた。他の3種の混合物において、O.A.C. における混合物が複素弾性率の最大値を示すとはかぎらず、むしろ -1% の配合のものが大となる結果が得られた。また複素弾性率のバインダー量による変化の程度は温度により大きく変化することは注目すべき結果であろう。

**(2) 繰返し載荷による動的性状の変化**

本研究においては、

- (a) 繰返し載荷過程における混合物の力学的性状の変化をいかなる性状を用いて把握すべきか
- (b) 繰返し載荷による混合物の破壊はどのような状態で生ずるか
- (c) 繰返し載荷過程における混合物の力学的性状の変化の状態と破壊とがいかなる関連性をもっているか

などを検討することを目的とし、まずアスファルトコンクリート (AC-B<sub>(s,ss,b)</sub>) を用いて、温度 10°C、周波数 10 Hz、ひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  におけるひずみ制御方式の繰返し載荷試験を約 10 本の供試体について行った。図一6 は例として、繰返し載荷回数ごとのたわみならびに荷重の波形を示したものである。

これらの実験結果から、ひずみ制御方式による繰返し載荷試験において、応力波形の振幅は繰返し載荷回数が増すにしたがい低下すること、またかなりの変動はあるが位相角は増大する傾向が見られることが明らかにされた。図一7 はこれらのことからベクトルで示される複素弾性率の載荷回数の増加に伴う変化を概念的に示したものである。図よりアスファルトコンクリートの疲労は弾性的要素に主として生じ、粘性的要素にはほとんど生じていないことが推測される。しかし繰返し載荷過程における位相角を精度よく測定することの困難性などから、本研究においては位相角の問題は将来の課題として残し、応力の低下のみに注目し、その論を進めることにする。すなわち応力と与えたひずみ量との比として得られる複素弾性率の大きさをもって繰返し載荷を受けるアスファルト混合物の力学的性状の変化を論ずることを試みた。

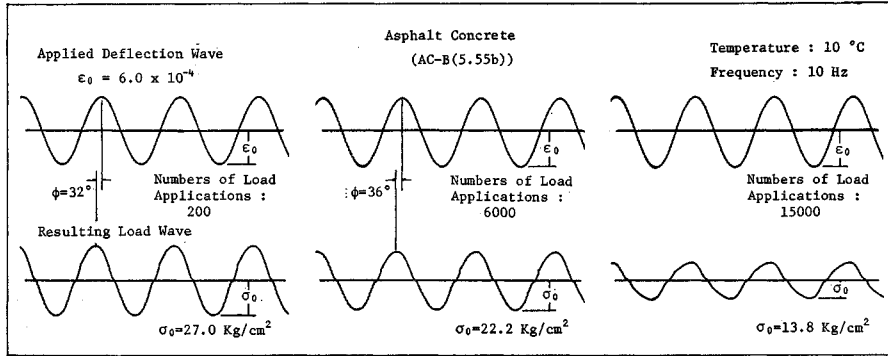
複素弾性率の大きさと繰返し載荷回数の関係を詳細に求めるために、アスファルト混合物の種類として、

- a. アスファルトコンクリート (AC-B)
- b. トベカ (TP)
- c. ロールドアスファルト (RA)

表一3 各種混合物の複素弾性率 ( $\times 10^4 \text{kg/cm}^2$ )

Type of Mixture	Binder Content (%)	Temperature (°C)						
		-10	-5	0	5	10	15	20
AC-B	4.55	10.9	9.6	8.3	7.2	6.3	4.5	2.9
	5.55	10.8	9.5	8.1	7.0	6.0	4.2	2.4
	6.55	10.8	9.3	7.9	6.7	5.6	3.7	1.8
TP	6.25	9.9	8.1	6.5	5.6	4.2	3.1	1.8
	7.25	9.7	7.8	6.4	5.3	4.0	2.9	1.6
	8.25	9.5	7.7	6.2	5.0	3.7	2.4	1.2
RA	4.75	11.1	10.6	9.5	9.1	8.4	6.0	3.3
	5.75	11.1	10.5	9.3	8.5	8.1	5.7	3.0
	6.75	11.0	10.3	9.0	8.0	7.5	5.1	2.2
AM	10.5	7.5	6.3	5.0	4.3	2.8	2.2	1.2
	11.5	7.1	5.7	4.7	3.9	2.5	2.0	1.1
	12.5	6.8	5.2	4.0	2.9	2.1	1.6	0.8

(注) 載荷時間:  $1.6 \times 10^{-2}$  秒



図—6 繰返し載荷による応力波形の変化

d. アスファルトモルタル (AM)

e. グースアスファルト (GA)

を選択し、各種の条件下において繰返し載荷試験を試みた。

図—8 は、例として温度 10°C、周波数 10 Hz、ひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  において、アスファルトコンクリート (AC-B(5.55b)) に関する複素弾性率と繰返し載荷回数との関係を両対数紙上に示したものである。他の混合物についてもひずみ制御方式の繰返し載荷試験を行った結果同様な関係が得られた。ここに共通して見られる現象は両対数紙上で載荷回数が増加するとともに複素弾性率は直線的に低下し、ある載荷回数近辺に至って急激な低下を示していることである。

図—9 はこれらを概念的に示したものであるが、これは繰返し載荷による力学的性状の変化ならびに破壊を如実に示しているといえよう。この図を用いて繰返し載荷による力学的性状の変化ならびに破壊について論ずるにあたっての用語を定義し、次のとおりとする。

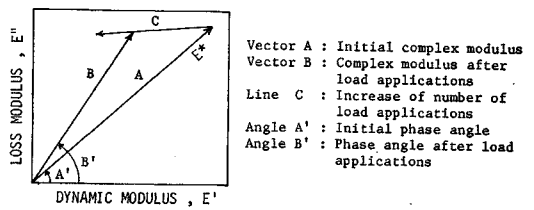
- a. 直線  $l_1$  の勾配を複素弾性率の低下率 (Coefficient of Decrease of Complex Modulus)
- b. 繰返し載荷初期における複素弾性率の値を初期の複素弾性率 (Initial Complex Modulus)
- c. 2 直線 ( $l_1, l_2$ ) の交点における載荷回数を破壊回数 (Number of Cycle to Failure)
- d. c. に述べた破壊回数における複素弾性率の値を破壊時の複素弾性率 (Complex Modulus at Failure)

a) 繰返し載荷による複素弾性率の変化

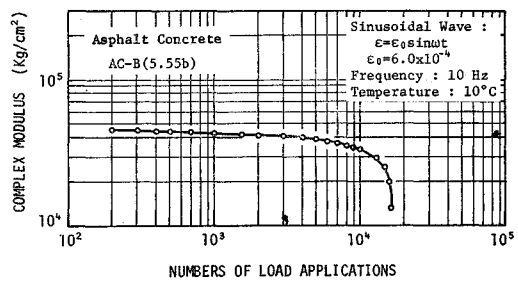
① ひずみ量を変化させた場合

混合物に与えるひずみ量と繰返し載荷による複素弾性率の変化との関連性を検討するために、ひずみ量を  $3.5 \times 10^{-4}$  から  $1.4 \times 10^{-3}$  まで変化させ繰返し載荷試験を行った。

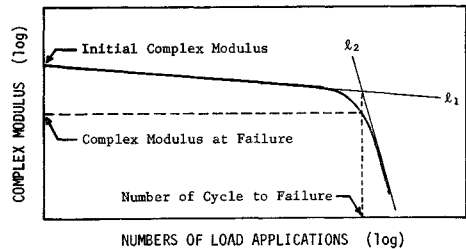
図—10 は、アスファルト コンクリート、アスファル



図—7 繰返し載荷に伴う複素弾性率のベクトル ( $E^*$ ) の変化を示す概念図



図—8 繰返し載荷による複素弾性率の変化



図—9 複素弾性率変化の概念図

トモルタル、グースアスファルトに関する両者の関係を両対数紙上に示したものである。なお図は本来 Strain  $\epsilon_0$  を横軸にとるべきかもしれないが、通常疲労研究における整理の方法すなわち 図—1, 2 を基本の型としてこのような表現法を用いた。以下数葉の図についても同様

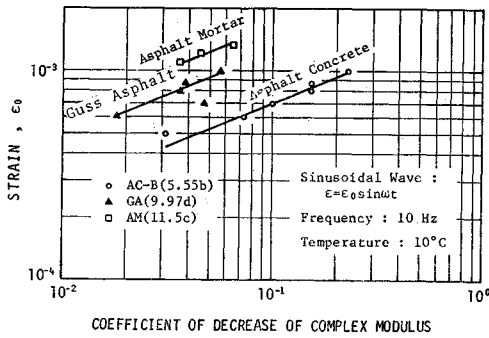


図-10 ひずみ量と複素弾性率の低下率(横軸)との関係

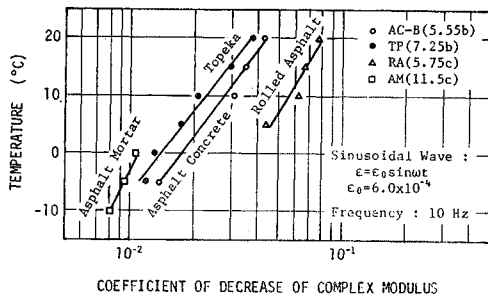


図-11 温度と複素弾性率の低下率との関係

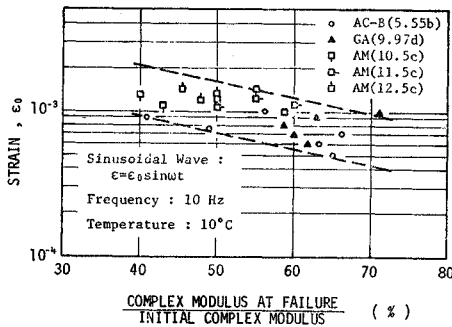


図-12 ひずみ量と破壊時および初期の複素弾性率の比(横軸)との関係

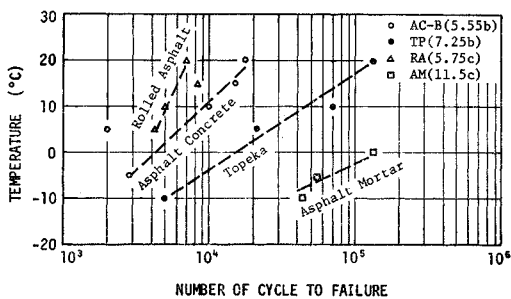


図-13 温度と破壊回数との関係

の表現法を用いた。

図より、ひずみ量と複素弾性率の低下率との関係は、ある程度のばらつきを見せながらも両対数紙上においてほぼ直線として示され、またひずみ量が大きくなればその低下率も大となることが明らかにされた。これはひずみ量が大きくなるとアスファルト混合物に生ずる載荷1回当りの性状変化が大きくなることを意味している。

② 温度を変化させた場合

各種の混合物について温度が変化したとき、複素弾性率の低下率はいかなる変化を示すかを求めるために、温度 -10~20°C、ひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  において試験を行い、図-11 に示すような関係を得た。

図は温度の上昇につれて複素弾性率の低下率は増大する傾向を示している。

b) 繰返し載荷による破壊

アスファルト混合物の繰返し載荷による破壊現象をいかなる性状で表現すればよいかを検討するために、破壊時の複素弾性率をとりあげた。すなわち混合物の複素弾性率がどの程度まで低下したならば破壊現象が生ずるかを把握することができるなら、破壊を予想する上からも非常に有意義となろう。また前述した破壊回数も混合物の繰返し載荷の抵抗性を表わす重要な1つの因子であることから、それらについても併せて論ずることとする。

① ひずみ量を変化させた場合

各種の混合物についてひずみ量を変化させた場合、破壊時と初期の複素弾性率の比がいかなる値を示すかを求めるために、図-12 にその比とひずみ量の対数との関係を示した。

図はひずみ量が大きくなれば複素弾性率の初期と破壊時における値の比は小となることを示しており、ひずみ量  $5.0 \times 10^{-4} \sim 1.4 \times 10^{-3}$  の領域において、その比は40~70%の範囲にあるという結果が得られた。これはひずみ量が大きなるほどいったん繰返し載荷による破壊現象が生ずると急速に破壊が進行することを示している。ひずみ量と破壊回数との関係については前述(図-1,2)したのでここでは省略する。

② 温度を変化させた場合

各種の混合物についてひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  における破壊時と初期の複素弾性率の比が温度によりいかなる影響を受けるかについて検討を試みた結果、その値はほぼ  $70 \pm 10\%$  の中にばらつくことが示されたが、温度変化に対する明瞭な変化の傾向は見られなかった。

破壊回数が温度によりいかなる変化を示すかを検討するために、型の異なる4種の混合物について、ひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  において試験を行った結果を図-13 に示す。

図より破壊回数は温度の上昇に伴い増加することが明らかにされ、また混合物の型により破壊回数が温度によ



ってうける影響は異なることが明らかにされた。すなわち温度による破壊回数の変化はロードアスファルトが最も小であり、次にアスファルトコンクリート、トペカとなり、アスファルトモルタルが最も大であった。

c) 複素弾性率の低下率と破壊回数との関係

図一14は、アスファルトコンクリート、アスファルトモルタル、グースアスファルトについて、温度 10°C においてひずみ量を変化させた場合の複素弾性率の低下率と破壊回数との関係を両対数紙上に示したものである。

図は複素弾性率の低下率が小さいほど破壊に至るまでの繰返し載荷回数は大となることを示している。これはひずみ量が小となれば低下率は小(図一10)、また破壊回数は大(図一2)となることから、容易に推論できる。また両者の関係は混合物の型ごとに直線として示され、その勾配は若干異なるようである。

一方、温度を変化させたときの両者の関係がどのようになるかを求めるために、ひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  と一定としたときのそれらの関係を 図一15 に示した。

図はひずみ量を変化させた場合と全く逆の傾向、すなわち複素弾性率の低下率が大きなるほど破壊回数は大となる傾向があることを示している。これは温度の上昇につ

れて低下率は大(図一11)、破壊回数も大(図一13)となることから推論されるものと思われる。また両者の関係は混合物の型によりおのおの直線として示され、その勾配はほぼ同一であると思われる。

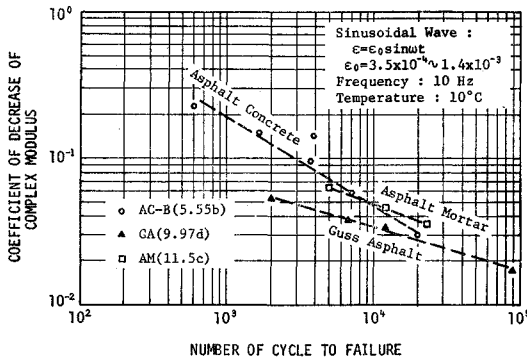
以上のことより、一定温度においてひずみ量が增大すれば、繰返し載荷による力学的性状の変化は大となり、破壊回数は小となると結論される。また一定ひずみにおいて温度が上昇すれば、力学的性状の変化は大となるが、粘性的要素の増大に伴う繰返し載荷に対する抵抗性は大となると考えることができる。

5. 初期の複素弾性率とその低下率との関係

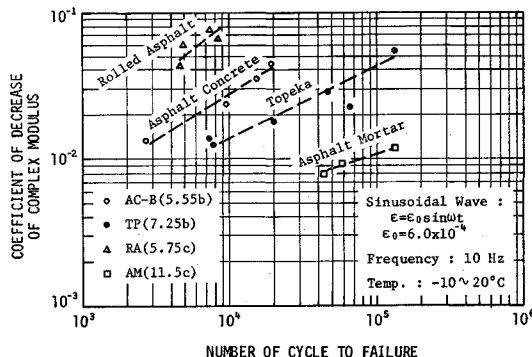
図一16は4種の代表的な混合物について温度を変化させたとき、載荷時間  $1.6 \times 10^{-2}$  秒(周波数 10 Hz)における複素弾性率と低下率との関係を両対数紙上に示したものである。

図より、各混合物について初期の複素弾性率と低下率は両対数紙上においてほぼ直線関係として示され、複素弾性率の低下に伴いその低下率は増大することが明らかにされた。また複素弾性率の大きさ一定、例として  $6.0 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup> なる値を示す点についてアスファルトコンクリートの低下率を基準としたとき、他の混合物はいかなる値をとるかを考察すれば表一4に示すような値が得られる。

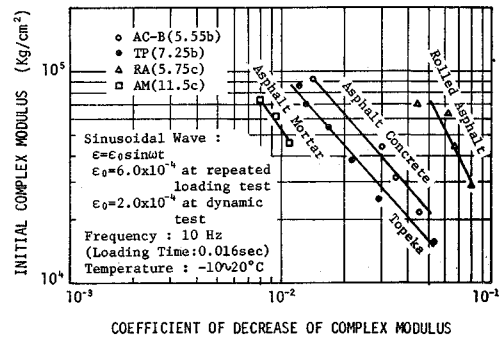
ロードアスファルト(RA<sub>(5.75c)</sub>)はアスファルトコンクリート(AC-B<sub>(5.55b)</sub>)に比較しその低下率は3倍である。このことはロードアスファルトは外力を Mass Viscosity で受けもち、アスファルトコンクリートは骨



図一14 ひずみ量を変化したときの複素弾性率の低下率(縦軸)と破壊回数との関係



図一15 温度が変化したときの複素弾性率の低下率と破壊回数との関係



図一16 初期の複素弾性率と複素弾性率の低下率との関係

表一4 アスファルトコンクリートの複素弾性率の低下率を基準としたときの他の混合物のそれとの比

Asphalt Concrete (AC-B <sub>(5.55b)</sub> )	1
Topeka (TP <sub>(7.25b)</sub> )	0.775
Rolled Asphalt (RA <sub>(5.75c)</sub> )	3
Asphalt Mortar (AM <sub>(11.5c)</sub> )	0.45

材のかみ合せで受けもつとされていることなどから、外力への抵抗の機構の差に基づくものと思われる。トペカ (TP<sub>(7.25b)</sub>)、アスファルトモルタル (AM<sub>(11.5c)</sub>) はおのおの 0.775, 0.45 とアスファルトコンクリートより小さな値を示しており、このことはアスファルトコンクリートに比しそれらの混合物は骨材の細粒分が多くバインダー量が多いことなどによるものと思われる。アスファルトモルタルとロールドアスファルトの間には約 6.6 倍の開きが見られ、これはアスファルトモルタルに粗骨材を加えることによりロールドアスファルトを得ていること

から、粗骨材の混入とそれに伴うバインダー量の減少は複素弾性率の低下率を大きくすると考えられる。

以上のことからひずみ量一定の場合、アスファルト混合物の複素弾性率の大きさと繰返し载荷によるその変化との間には密接な関係が存在し、初期の複素弾性率の値が小なものほど力学的性状の変化は大であると結論されよう。

6. 初期の複素弾性率と破壊回数との関係

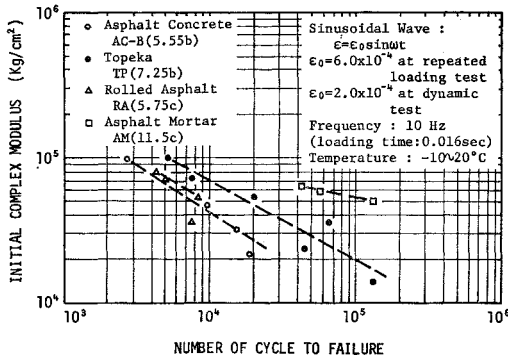
図一17 は 4 種の混合物について、各温度において载荷時間  $1.6 \times 10^{-2}$  秒 (周波数 10 Hz) における初期の複素弾性率の大きさと破壊回数との関係を両対数紙上に示したものである。

図より各混合物について両者の関係はほぼ直線として示され、複素弾性率の低下に伴いその破壊回数は増大することが明らかになった。また両者の関係を示す直線の勾配は混合物の型により異なり、アスファルトモルタル (AM<sub>(11.5c)</sub>) の勾配が他の 3 種に比し緩やかであり、アスファルトコンクリート (AC-B<sub>(5.55b)</sub>) とロールドアスファルト (RA<sub>(5.75c)</sub>) はほぼ同一であった。また  $6.0 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup> なる値を示す複素弾性率に注目するとき、破壊回数が最も大なるものはアスファルトモルタル、次にトペカとなり、アスファルトコンクリートとロールドアスファルトはほぼ同一な破壊回数を示した。

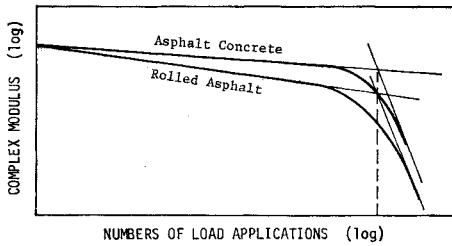
アスファルトコンクリートとロールドアスファルトを初期の複素弾性率、低下率、破壊回数の観点から比較しそれらの関係を概念的に図に示すと 図一18 のようになる。すなわち複素弾性率が同一な値であるアスファルトコンクリートとロールドアスファルトを考えると、破壊回数は同一となるが、繰返し载荷過程における複素弾性率の変化は異なり、その変化はアスファルトコンクリートに比しロールドアスファルトが約 3 倍の数値を示している。これは先に述べたように外力への抵抗の機構の差に基づくものと推測される。

バインダー量が初期の複素弾性率と破壊回数の関係におよぼす影響を考察するために、アスファルトコンクリート (AC-B) について両者の関係を 図一19 に示した。

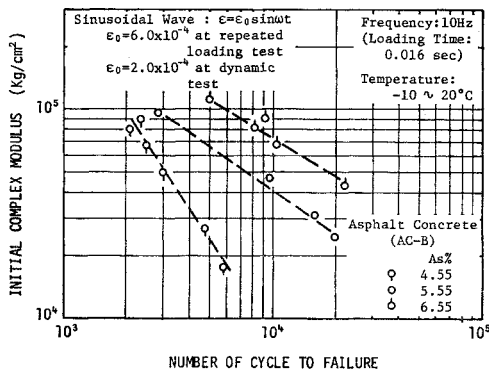
図より、各バインダー量において両者の関係は両対数紙上においてほぼ直線として示され、その勾配はバインダー量が増加するにつれて緩やかとなる傾向を示した。また複素弾性率が同一な値をとる点における破壊回数を見るに、バインダー量が増加するにつれ破壊回数は大となるが、高複素弾性率領域より低複素弾性率領域においてバインダー量の増加に伴う破壊回数の増大は顕著である。



図一17 初期の複素弾性率と破壊回数との関係



図一18 载荷回数の増加に伴う 2 種の混合物の複素弾性率の変化を示す概念図



図一19 アスファルト量が初期の複素弾性率と破壊回数との関係におよぼす影響

## 7. 結 論

本研究において明らかにされた事項を要約すればおよそ次のとおりである。

### (a) 動的性状について

アスファルト混合物の動的性状を複素弾性率ならびに損失正接として見るとき、その粒度組成、バインダー量空隙の3つを包括した骨材体積率( $C_v'$ )およびバインダーの粘弾性状によって、その動的性状のおおよそを説明することができる。

### (b) 繰返し載荷による性状変化について

- 1). 繰返し載荷による力学的性状の変化は複素弾性率の低下率として求めることができる。
- 2). 複素弾性率の低下率と破壊回数との間には、密接なる関係が存在する。
- 3). 温度が一定の場合、アスファルト混合物に生ずるひずみ量が大きなるほど、繰返し載荷による力学的性状の変化は大となり、破壊現象が生ずると急速に破壊が進行し破壊回数は小さい。
- 4). 本実験の範囲内において、ひずみ量が一定の場合、温度が高いほど力学的性状の変化は大となるにもかかわらず、破壊回数は大となる。

### (c) 動的性状と繰返し載荷による性状変化との関係について

アスファルト混合物の動的性状(複素弾性率)と繰返し載荷による力学的性状の変化ならびに破壊との間には密接な関係が存在するものと思われる。しかしその関係はアスファルト混合物の種類ならびに試験温度などによりかなり複雑なものとなる。

本論文は北海道大学工学部交通材料研究室におけるアスファルト混合物の繰返し載荷による性状変化を研究するグループ、すなわち武市靖、土山和夫、本間政幸、中谷誠および著者ら2名の研究成果であり、著者ら2名が主としてとりまとめたものである。また本論文の作成にあたり森吉昭博、上島壯の諸氏にご討議をいただいた。以上を記して関係者各位に厚く感謝の意を表するものである。

なお本研究は文部省科学研究費の交付を受けて行ったことを付記する。

### 参 考 文 献

- 1) Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proceedings, 1972.
- 2) Nijboer, L.W.: Mechanical properties of asphalt materials and structural design of asphalt road, H.R.B. Proc., Vol. 33, 1954.
- 3) Pell, P.S.: Fatigue of bituminous materials in flexi-

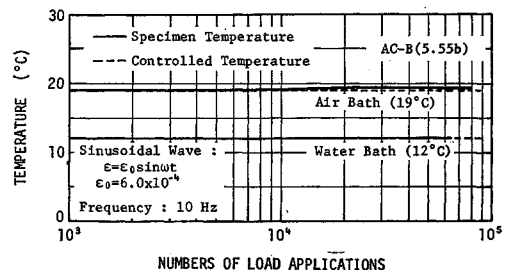
- ble pavements, Proc. Inst. Civil Eng., Vol. 31, 1965.
- 4) Saal, R.N.J. and P.S. Pell: Fatigue characteristics of bituminous road mixes, Brit-Soc. of Rheology, 1959.
- 5) Monismith, C.L.: Asphalt mixture behavior in repeated flexure, I.E.R. Report No. TE-65-9, 1965.
- 6) Miura, Y.: On the fatigue fracture and its Statistical aspect of bituminous mixture, Proc. of J.S.C.E., No. 212, 1973.
- 7) Monismith, C.L.: Flexibility characteristics of asphalt paving mixture, Proc. A.A.P.T., Vol. 27, 1958.
- 8) Raithby, K.D.: The effect of rest periods on the fatigue performance of a hot-rolled-asphalt under reversed axial loading, Proc. A.A.P.T., Vol. 39, 1970.
- 9) 上島壯・森吉昭博・菅原照雄: アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究, 土木学会論文報告集, 第221号 1974.
- 10) Pell, P.S.: Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes, Proc. Internat. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, 1962.
- 11) Monismith, C.L.: Asphalt mixture behavior in repeated flexure, I.E.R. Report No. TE-64-2, 1964.
- 12) 笠原篤・菅原照雄: アスファルト混合物の動的応答に関する研究, 土木学会北海道支部研究発表論文集, 1972.
- 13) 笠原篤・菅原照雄: アスファルト混合物の動的応答に関する研究, 土木学会論文報告集第215号, 1973.
- 14) Monismith, C.L., R.L. Alexander and K.E. Secor: Rheological behavior of asphalt concrete, Proc. A.A.P.T., Vol. 35, 1968.
- 15) 笠原篤・菅原照雄: アスファルト混合物の動的応答に関する研究(第3報), 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集, 第5部, 1973.

## 【付 録】

### 温度制御ならびに供試体について

一般に粘弾性体が繰返し載荷を受ける場合、内部粘性により発熱現象が生ずるとされている。アスファルト混合物に関する繰返し載荷試験において、試験中供試体が設定温度になっているか否かを検討するために、密粒度アスファルトコンクリートの供試体中央部に熱電対を埋込み水槽ならびに空気中において、ひずみ制御方式の繰返し載荷試験を行い、供試体の温度測定を試みた。

付図は、恒温水槽中においては設定温度を 12°C, 空



付図 供試体温度と載荷回数との関係

気中においては  $19^{\circ}\text{C}$  とし、周波数  $10\text{ Hz}$ 、ひずみ量  $6.0 \times 10^{-4}$  において試験を行って得られた载荷回数と供試体温度の関係を示したものである。

図は、水槽中における供試体の温度変化は見られず、また空気中における供試体の温度は载荷回数  $10\,000$  回程度までは変化を示さず、その後若干の温度上昇が見られ、载荷回数  $25\,000$  回程度から約  $0.5^{\circ}\text{C}$  の温度上昇を示し平衡状態にあることを示している。

以上の結果ならびに水槽方式は空気槽方式に比較し設定温の精度が高いことにより、本研究においては供試体に合成ゴムラテックスを塗付しその表面に薄いゴム被膜を形成せしめることにより、試験中の水による影響を少なくし、水槽方式により温度管理を行った。なお低温における繰返し载荷試験においてもゴム被膜に亀裂の発生などの現象は見られなかった。

(1974. 8. 8・受付)

---