

不規則なひずみ波形に対するアスファルト 混合物の動的応答に関する研究*

DYNAMIC RESPONSE OF BITUMINOUS MIXTURE TO RANDOM STRAIN WAVE

笠原 篤**・菅原 照雄***

By Atsushi KASAHARA and Teruo SUGAWARA

1. 本研究の目的

一般にアスファルト混合物（以下単に混合物という）は著しく複雑な性状をもつとされており、また、その性状に影響を及ぼす因子も多いことから、一般的特性を把握しにくいとされている。これらの影響因子を分類し整理してみるとおよそ次のようになろう。

(a) 環境に関するもの

- ① 温度
- ② 載荷時間

(b) 構成材料に関するもの

- ③ 骨材およびフィラーの形状、表面性状、質
- ④ アスファルトの性状

(c) 配合に関するもの

- ⑤ 粒度組成
- ⑥ アスファルト量

(d) 施工に関するもの

- ⑦ 混合状態（混合の方法、時間により大きく影響される）
- ⑧ 締め固めの状態、空隙率など（締め固めの方法、締め固め時の温度などにより、大きく影響される）

混合物の性質を明らかにするためにはこれら個々の因子の変化に伴うその性質の変化の規則性を見い出す必要がある。

混合物の力学的性状に関する多くの研究および筆者らの研究¹⁾によれば混合物は通常いわれているように“材質が極端に変化するので一般的特性がつかみにくいもの”ではなく、すべてを統一解釈できるほどの規則性を見い出すことはできないにしろ、かなりの規則性をも

ち、また、理論的解析ができる材料であると考えてもよい。たとえば、混合物の動的性状と静的性状は非常に異なっていると考えられていたものを、筆者らは変形係数的一种であるクリープコンプライアンスを介することにより両者を結びつけ、双方の性状は無関係ではなく、温度が一定の場合載荷時間への応答が異なるだけであり、その力学的性状は連続的に変化することを明らかにした²⁾。そこにおいては温度および載荷時間の広範囲にわたってのレスポンスをとらえ、混合物の力学的性状の規則性を見出し、粘弾性論などの理論の適用性を確認した。また、動的性状については振動の基本波形である正弦波を用いた共振法³⁾、強制振動非共振法⁴⁾により、広範囲な温度および周波数領域においてアスファルト単体から混合物までの動的応答を求め、それらの基礎的な性状を論じてきた。

これらのことをふまえ、本研究では混合物の動的応答の一般的な規則性を明らかにし、その理論的裏づけをもって応用的展開をはかろうとするものである。

筆者らは本研究において、混合物に不規則なひずみ波形を与えたとき、その応答として示される応力波形を温度ならびに周波数を変化させて正弦波により得られた複素弾性率および位相角のデータを用い、不規則なひずみ波形をフーリエ級数に展開し、各項に対応した応力波形の成分を求め、それらを合成することにより求めようと試みた。また、これらの手法を用いるならば、鋼床版上の舗装およびフィルダムのアスファルトセンターコアなどこれまでその応力状態を求めることが非常に複雑であったものを、構造体とアスファルトの相互作用として明らかにすることができるであろう。さらにその延長として、混合物に外力が作用したときの破壊に対する安全性を破壊包絡線の考え方も用いて検討することができるであろう。

* 土木学会第 32 回年次学術講演会 V-186 にて一部発表

** 正会員 工博 北海道大学助手 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

2. 研究手順と実験方法

(1) 研究の手順

筆者らは混合物の動的性状について基礎的研究を進めてきてあり、それらの研究成果のつかさねから、不規則波が入力したときの応答波形を、基礎的な動的データと理論計算を用いて、求めることができるのではないかと考えるにいたった。ここではその手法を種々の試験機器を用いて実験的に確めることを試みている。

本研究において用いた手法の概念はフローチャートとして図-1に示してあり、その手法について簡単に説明してみるならば以下の手順になる。

- Ⓐ 不規則波をフーリエ級数に展開する。
- Ⓑ 強制振動非共振法によって得られる複素弾性率および位相角のマスターカーブから、フーリエ級数に展開された各項のひずみ波形に対する応力波形の振幅と位相

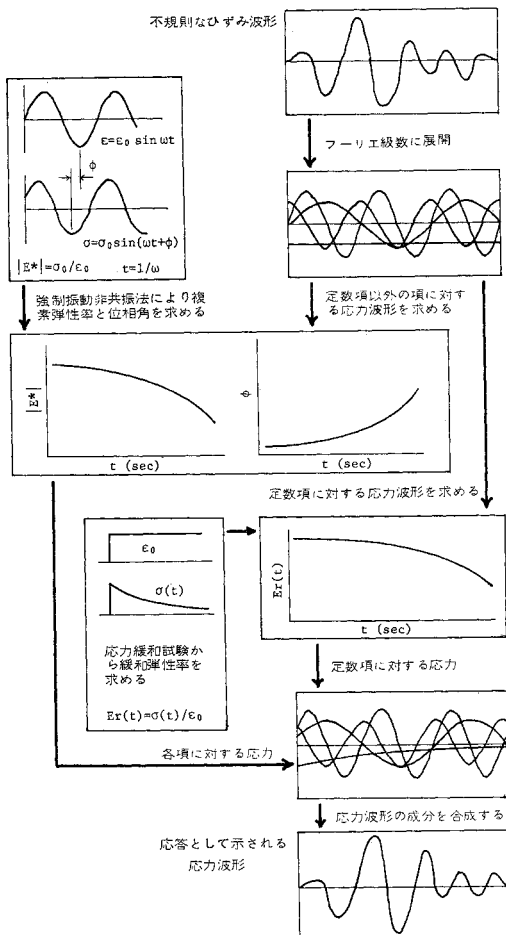


図-1 本研究における手法

差の値を求める。

㉑ フーリエ級数に展開したときの初項すなわち定数項に対しては、応力緩和試験から得られる緩和弾性率を用いて応力曲線を求める。

㉒ 各ひずみ波形の項に対する応力波形を合成することにより、不規則なひずみ波形に対する応答として示される応力波形を求める。

これらの手法を実証するために、舗装材料用動的載荷装置（電気・油圧サーボ方式）を用い、設定信号源には既設の低周波発振器に可変位相 2 出力超低周波発振器を加え、2 台の発振器の信号を加算アンプを介して合成し不規則波を得た。このもっとも単純な不規則波を供試体に入力し応答として示される波形を直線書きペンレコーダーに記録させ、理論計算から求めたものとの比較を試みた。ここでは不規則波をフーリエ級数に展開し、おのおのに対する応力波形を合成する手法を実験的に確めるために以下に示すような手順で実験を行った。

Ⓐ もっとも単純な不規則波として周波数の異なる 2 つの正弦波の合成波を用いて、応答として記録される応力波形が正弦的に変化する場合の周波数の応力波形の合成したもの一致するか否かを検討する。

Ⓑ フーリエ級数に展開したとき定数項が出てこない波形として三角波を用いて、応答として記録される応力波形とフーリエ級数に展開し動的データから理論計算により求めた応力波形と一致するか否かを検討する。

㉑ フーリエ級数に展開したときの定数項の取り扱いを明らかにするために、正弦波にオフセットを加えた波形を用いて、応答として示される応力波形が応力緩和曲線に沿ったものとなるかどうかを検討する。

㉒ 道路舗装を対象としたときの不規則波として Bell Shaped Wave を入力し、実験値と計算値との比較検討を行う。

㉓ フィルダムのアスファルトセンターコアなどを対象としたときの不規則波として地震波に類似した波形を入力し、実験値と計算値との比較検討を行う。

(2) 試験材料

表-1 粒度組成およびアスファルトの性状

試験混合物としては、一般舗装用加熱混合物の代表的なものとして密粒度アスファルトコンクリートを採用し、その粒度組成ならびに使用アスファルトの性状は表-1に示した

Sieve Opening (mm)	Passing (%)	Asphalt
13	100	Straight Asphalt 80/100
10	92.0	
7	75.0	
5	68.0	
2.5	47.0	
1.2	36.0	Pen. : 95 T _R & B : 47.0°C
0.6	25.0	
0.3	14.0	P.I. : -0.3
0.15	7.3	
0.074	6.0	

とおりであり、混合物中のアスファルト量は重量比で6%である。

規定の量計量された各材料を2ポアズ温度(140°C)で加熱混合し、40×30×6 cmの鋼製型枠内で30ポアズ温度(97°C)にてローラーコンパクターで転圧し、かつホイールトラッキング試験機を用い45°Cにおいて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。供試体は試料ブロックからダイヤモンドカッターにより4×4×35 cmに切り出し合成ゴムラテックスを塗付することにより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である。

(3) 試験法

a) 載荷装置

本研究に用いた載荷装置は舗装材料用供試体に電気・油圧サーボ機構により静的曲げ、動的曲げ、繰返し曲げを与えることのできる装置であり、その機能等についての詳細はすでに示してあるので^{4),5)}、ここでは不規則波の発生機構に関連したもののみを述べることにする。

本研究における不規則波は、2台の低周波発振器による合成波およびピンボード(31×60穴)にダイオードピンを差し込むことにより得られる波形の2種であるが、ピンボードについてはすでに記述してあるので⁶⁾、ここでは省略し、合成波についてのみ述べることにする。

もっとも単純な形の不規則波は2つの正弦波を合成することにより得られると思われることから、低周波発振器および可変位相2出力超低周波発振器の2台の発振器を用い合成波を得ることを試みた。すなわち、低周波発振器により発振させた正弦波で可変位相2出力超低周波発振器にトリガーをかけ、その周波数の整数倍の任意の周波数および位相の正弦波を発振させ、両者の波形を加算アンプにより合成し不規則波を得た。このような方法によれば、両者の正弦波の振幅、周波数、位相の任意の組合せにより、数多くの不規則波を得ることができる。なお、個々の波形はシンクロスコープにより試験中モニターされる。

b) 実験法

合成ゴムで被覆した供試体をスパン30 cm、載荷点間隔10 cmにセットし、恒温水槽中において正弦波ならびに不規則波を入力とするひずみ制御方式の強制曲げ振動非共振法を用い、直線書きペンレコーダーに入力波形であるたわみ波形およびその応答として示される荷重波形を並記させる方法を用いた。なお、与えたひずみ量は線形粘弾性領域と考えてもよい 10^{-4} のオーダーの大きさである。

(4) 解析法

a) 正弦波による応答

振幅 ε_0 、周波数 f の正弦的に変化するひずみを粘弾性体を与えるとひずみ $\varepsilon(t)$ は次のように表わされる。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi f$$

このひずみを受けた物体の応力も振幅 σ_0 、周波数 f で ϕ だけ位相の進んだ正弦的变化を示し、次式で表わされる。

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \phi), \quad \omega = 2\pi f$$

応力の振幅(σ_0)とひずみの振幅(ε_0)の比として複素弾性率を求めることができ、ひずみと応力の位相のずれにより得られる位相角(ϕ)は物体の粘性的要素の大きさを示しているものである。

b) 不規則波による応答

周期的な波形は一般にフーリエ変換することができ、周期 $2p$ の任意のひずみ波形は、正弦波および余弦波の無限級数の和として、次式のように表わされる。

$$\varepsilon(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos \omega t + b_n \cdot \sin \omega t)$$

$$a_n = \frac{1}{p} \int_0^{2p} \varepsilon(t) \cdot \cos \omega t \cdot dt$$

$$b_n = \frac{1}{p} \int_0^{2p} \varepsilon(t) \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

ここで、 $\omega = \frac{n}{p}\pi$

任意のひずみ波形に対して、応答として示される応力波形は、級数に分解されたひずみ波形の各項に対する応力波形を求めそれらを合成することにより得られるものと思われる。すなわち、正弦的に変化するひずみ波形に対しては、瞬間載荷における応力緩和曲線となると考えることができる。したがって、応力波形は複素弾性率($|E^*|$)および緩和弾性率($E_r(t)$)を介して以下のように表わされる。

$$\sigma(t) = \frac{a_0}{2} \cdot E_r(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cdot |E^*| \cdot \cos(\omega t + \phi) + b_n \cdot |E^*| \cdot \sin(\omega t + \phi)\}$$

ここで、 $|E^*|$ は角速度 ω における複素弾性率の大きさを示し、 ϕ は同じく角速度 ω におけるひずみと応力の位相差である。

3. 正弦波による動的応答

不規則なひずみ波形をフーリエ級数に展開し、各項に対する応答として示される応力波形の振幅と位相角を求めるためには、広範囲な温度および時間領域において角速度(ω)と複素弾性率($|E^*|$)の関係、角速度(ω)と位相角(ϕ)の関係をより正確に求める必要がある。さ

らに任意温度、任意時間における複素弾性率ならびに位相角を得るために、Ferry⁷⁾らが示した標準温度 (T_s) の考え方をを用いて標準温度から複素弾性率および位相角のマスターカーブの移程量 ($\log a_T$) を求め、任意温度における複素弾性率および位相角を得ることを試みている。

(1) 複素弾性率および位相角

温度 $-15 \sim 20^\circ\text{C}$ 、周波数 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ において、供試体中央部の上下縁のひずみを 2.0×10^{-4} となるように制御し、正弦的に変化するひずみ波形を供試体に入力し、その応答として示される応力波形を得る強制曲げ振動非共振法で実験を行い、同一試験条件において6本の供試体を用いて複素弾性率ならびに位相角を詳細に測定した。

同一試験条件における6本の供試体の平均値を用いて、複素弾性率ならびに位相角と載荷時間 ($t=1/\omega$) の関係を求め、それを図-2に示した。また、基準温度 (T_0) を 10°C としておのおののマスターカーブを描いたときの移程量は表-2に示してある。

各温度および各周波数における複素弾性率の変動係数はおよそ3~10%程度であり、温度が高いほど、また周波数が小さいほどその値は大きくなる傾向を示した。位相角のそれは17~30%程度であり、温度が低いほど、また周波数が小さいほどその値は大きくなる傾向を示した。

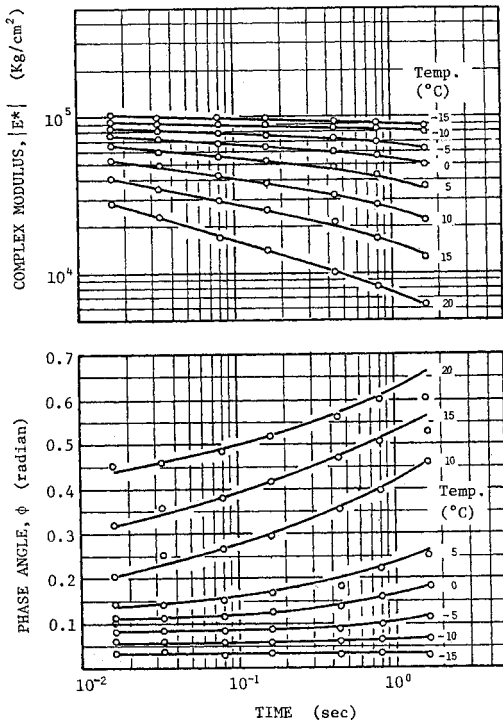


図-2 複素弾性率および位相角と載荷時間との関係

アスファルト混合物の複素弾性率はあまり大きなばらつきを示さないとしてもよいが、位相角については精度よく測定することの困難性に加えて、このような材料の特性からそれ自体かなりのばらつきを持っているものと考えべきものであろう。

(2) 任意温度における複素弾性率および位相角のマスターカーブ

時間・温度換算則からして、マスターカーブは図上に於いてその位置するところが温度によって異なるが、その形はまったく同一である。したがって、ある基準温度 (T_0) におけるマスターカーブと温度・移程量関係の双方から任意温度、任意時間における複素弾性率および位相角の値を求めることができる。

筆者らは先に Williams, Landel, Ferry らの提案した標準温度 (T_s) の概念⁷⁾をアスファルト混合物にも、ほぼ適用することができることを明らかにした⁶⁾。ここでは同様に T_s の考え方をを用い表-2に示した基準温度を 10°C としたときの移程量と温度の関係から、 T_s を求めた結果 $T_s = 38.6^\circ\text{C}$ なる値を得た。なお、筆者らの行った過去の実験データから、密粒度アスファルトコンクリートの T_s の値はおよそ $36 \sim 40^\circ\text{C}$ であり、この種の密粒度アスファルトコンクリートの T_s は $38 \pm$

表-2 シフトファクター

Temperature (°C)	$\log a_T$	$\log a_T$ from T_s
-15.0	5.95	6.43
-10.0	4.55	4.66
-5.0	3.12	3.19
0	1.92	1.96
5.0	0.95	0.91
10.0	0	0
15.0	-0.80	-0.79
20.0	-1.59	-1.49
25.0	—	-2.10
30.0	—	-2.65
35.0	—	-3.15
40.0	—	-3.59

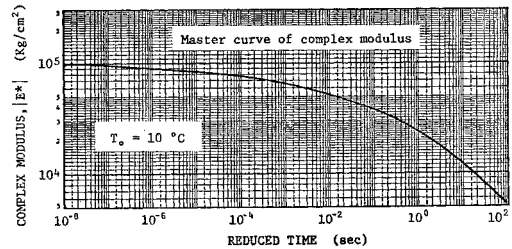


図-3 複素弾性率のマスターカーブ

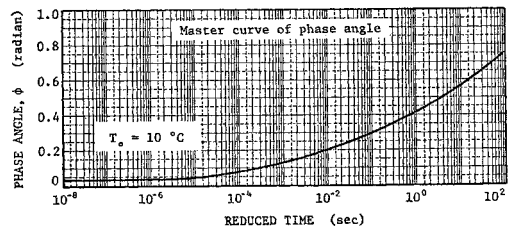


図-4 位相角のマスターカーブ

2°C 程度であるとしてもよいであろう。

標準温度を 38.6°C として、 T_s から移程量 ($\log a_T$) を算出し、その結果を同じく表-2 の右の項に示した。表を見るに両者の移程量はよい一致を示しているとしてもよいと思われる。このことから T_s から算出した移程量を用い、基準温度を 10°C として他の温度で測定した測定点 (336 点) を移程させ、それらの各点を用いて最小 2 乗法により、複素弾性率および位相角のマスターカーブを 3 次式で近似させ、その様子を 図-3, 4 に示した。

図を見るに、おのおののマスターカーブを 3 次式で近似させてもさして問題はないと思われることから、任意温度 (T °C) および任意時間 (t sec, $t=1/\omega$) における複素弾性率および位相角は次式によって示され、次章以下、理論計算においてはこれらの実験式を用いることとする。

$$\log a_T = -12.33 \times \frac{(T+273) - 283}{(T+273) - 210}$$

$$\log |E^*| = -0.001974(\log t - \log a_T)^3 - 0.036409(\log t - \log a_T)^2 - 0.244203(\log t - \log a_T) + 4.37095$$

$$\phi = 0.000272(\log t - \log a_T)^3 + 0.012744(\log t - \log a_T)^2 + 0.129703(\log t - \log a_T) + 0.411432$$

ここで、 T : 任意温度 (°C)

t : 任意時間 (sec)

$$(t=1/\omega, \omega=2\pi f)$$

なお、複素弾性率の実測の範囲は $1.0 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ kg/cm²、位相角の実測の範囲は 0.4~0.73 ラジアンであることから、各温度における時間の適用範囲は表-3 に示すとおりとなる。しかし、短時間領域において、複素弾性率の上限値は 1.0×10^5 kg/cm²、位相角の下限値は 0.4 ラジアンであることから、表-3 に示された各温度における時間の適用範囲よりも短い時間についてはおのおの上限値 (1×10^5 kg/cm²)、下限値 (0.4 ラジアン) を用いればよい。

また、理論計算においては角速度 (ω radi-

an/sec) と複素弾性率ならびに位相角との関係を用いるが、ここでは工学的な利用にも便利のようにと考え載荷時間 ($t=1/\omega$) に変換して用いた。

4. 基本的な波形に対する動的応答

ここでは前述したような手順で実験を進め、基本的なひずみ波形を供試体に入力し応答として示される波形の実測値と理論計算値との比較を行っており、本研究で示した考え方を実証することを試みた。なお、理論計算においてフーリエ級数の各項の係数を求める積分は、不規則なひずみ波形 $\epsilon(t)$ を周期 $2p$ の 59 等分した座標点 ($t, \epsilon(t)$) で与え、その 1 区間をさらに 10 等分した座標点を用いシンプソンの数値積分法を用いた。

(1) 2 つの正弦波の合成波に対する応答

実測と理論計算との比較に最適なものとしては、もっとも簡単な不規則波でその成分が既知であるものであることから、ここではまず 2 つの正弦波を合成した不規則波を取り上げた。2 つの正弦波の振幅、周波数、初期位相を変化させることにより種々の形の不規則波を得ることができるが、ここでは振幅を同一とし、ある周波数 f (Hz) の正弦波とその倍の周波数をもつ正弦波で初期位相が零のもの、30° (0.524 radian) のものを用いた。写真-1 は 1 Hz と 2 Hz の正弦波で初期位相が零のものをシンクロスコープに写したものであり、その合成波 (波形 A とよぶ) も示してある。写真-2 も同様であるが、2 Hz の正弦波で初期位相が 30° 進んだものであり、その合成波 (波形 B とよぶ) を示してある。波形 A および B を式で示せば次のようになり、おのおのは周期 $2p$

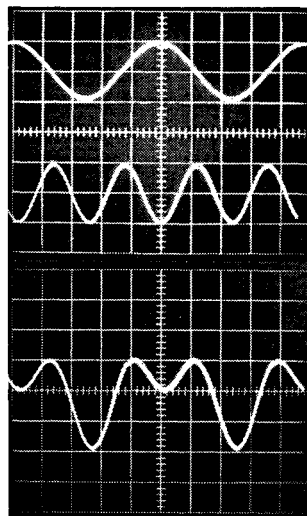


写真-1 波形 A (2 つの正弦波の合成波, 初期位相 0°)

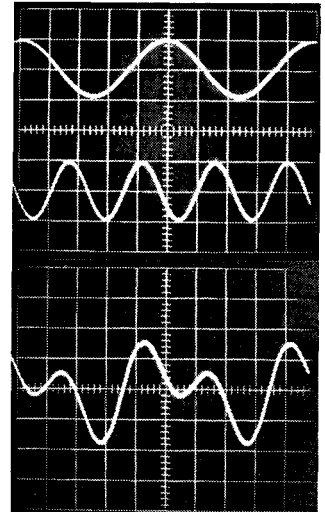


写真-2 波形 B (2 つの正弦波の合成波, 初期位相 30°)

表-3 実験式の適用範囲

Temperature (°C)	Loading Time (sec)
-15.0	$1.58 \times 10^2 \sim 1.32 \times 10^3$
-10.0	$2.68 \times 10^{-4} \sim 2.24 \times 10^6$
-5.0	$9.08 \times 10^{-6} \sim 7.59 \times 10^4$
0	$5.35 \times 10^{-7} \sim 4.47 \times 10^3$
5.0	$4.76 \times 10^{-8} \sim 3.98 \times 10^2$
10.0	$5.86 \times 10^{-9} \sim 4.90 \times 10^1$
15.0	$9.51 \times 10^{-10} \sim 7.94 \times 10^0$
20.0	$1.90 \times 10^{-10} \sim 1.58 \times 10^0$

表一4 波形AおよびBを級数に展開したときの係数

n	ω (radian/sec)	t (sec)	Wave A		Wave B	
			a_n	b_n	a_n	b_n
0	0.0	0.0	3.16329E-09	0.0	2.00716E-09	0.0
1	6.28	0.1592	-5.00000E-01	0.0	-5.28639E-01	2.86060E-02
2	12.57	0.0796	-4.99999E-01	0.0	-3.13720E-01	-4.29290E-01
3	18.85	0.0531	-5.80706E-10	0.0	-6.52763E-10	-1.96027E-09
4	25.13	0.0398	-4.85477E-11	0.0	2.14897E-11	-2.08607E-09
5	31.42	0.0318	-1.30591E-09	0.0	8.32031E-10	2.39962E-10
6	37.70	0.0265	-8.77630E-10	0.0	-2.03683E-09	-8.64158E-11
7	43.98	0.0227	2.03439E-10	0.0	-1.09919E-09	-3.22403E-09
8	50.27	0.0199	1.82764E-09	0.0	8.38749E-11	-6.08664E-10
9	56.55	0.0177	-7.49343E-11	0.0	4.87060E-10	8.15127E-10

=1/f の不規則波となる。

波形A : $\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin 2\pi ft + \epsilon_0 \sin 4\pi ft$

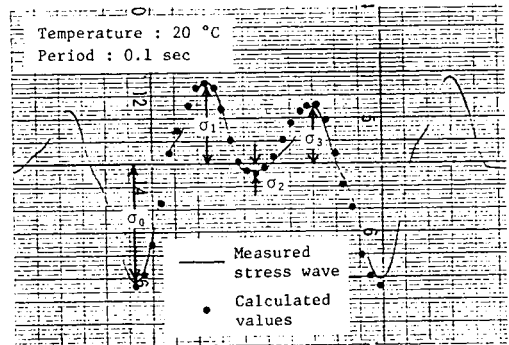
波形B : $\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin 2\pi ft + \epsilon_0 \sin(4\pi ft + 0.524)$

実験は温度 20, 5, -15°C および周期 0.1, 1, 10 秒において、波形 A および B を用いて、ひずみの最大値を 2.0×10^{-4} に制御したものを供試体に入力し、その応答として示される荷重波形を直線書きペンレコーダーに記録する方法で行った。一方、計算は不規則なひずみ波形におけるひずみの最大値を 1 としてフーリエ級数に展開しその係数を求める方法で行い、波形 A, B についてそれぞれの係数 a_n, b_n を 10 項まで求めた結果を表一4に示した。表から、波形Aについては当然係数 a_1, a_2 の2項で近似でき、波形Bについては係数 a_1, a_2, b_1, b_2 の4項で近似できることが明らかとなった。

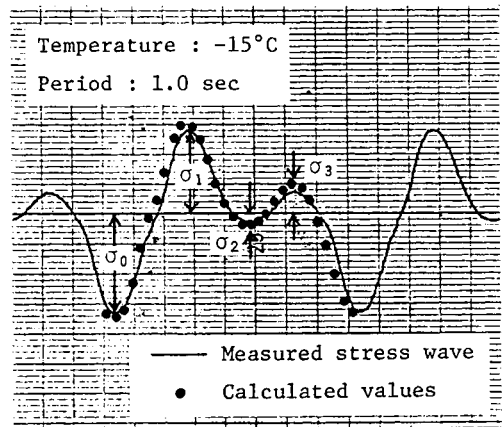
フーリエ級数に展開したときの各項に対応した応力波形の項を前述した複素弾性率および位相角を用いて算出し、それらを合成することにより得られたものと実験的に得た応力波形とを比較し、波形Aについては温度 20°C、周期 0.1 秒、波形Bについては温度 -15°C、周期 1 秒におけるものを例にとり、おのおの図一5, 6に示した。また、図中に示したように応力波形の最大値を σ_0 、波形の極大、極小値を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とし応力波形の特徴を表わすために最大値との比を用いて、各温度および各周期における実測と計算値の比較(表一5)を行った。

図一5, 6をみるに、記録された応力波形の応力の零近辺には供試体を両振りするにあたっての両端の支点のゆ

るみの影響と思われる波形のみだれがみられることから、計算により得られた応力波形とに若干の差がみられる。表一5から、波形A, Bの両者について、低温ならびに高温領域において応力の最大値および波形の特徴を表わす比の値は、前述したように $|\sigma_1|$ および σ_2 のばらつきを考慮するならば、一致していると判断してもさしつかえないと結論されよう。



図一5 波形Aに対する応答波形の実測と計算値



図一6 波形Bに対する応答波形の実測と計算値

表一5 波形AおよびBに対する応答波形の実測値と計算値の比較

Temperature (°C)		-15.0			5.0			20.0		
Period (sec)		0.1	1.0	10.0	0.1	1.0	10.0	0.1	1.0	10.0
Wave A	σ_0 (kg/cm ²)	25.1(25.7)	21.1(24.0)	20.1(23.4)	16.9(16.9)	13.3(13.5)	7.6(7.8)	7.0(7.5)	3.9(4.3)	2.1(2.1)
	σ_1/σ_0	0.58(0.57)	0.56(0.57)	0.51(0.57)	0.61(0.61)	0.57(0.64)	0.61(0.67)	0.71(0.68)	0.71(0.72)	0.78(0.77)
	σ_2/σ_0	0.0(0.0)	0.0(0.01)	0.01(0.01)	0.03(0.03)	0.05(0.05)	0.06(0.08)	0.06(0.08)	0.10(0.12)	0.16(0.17)
	σ_3/σ_0	0.55(0.55)	0.50(0.56)	0.48(0.56)	0.50(0.52)	0.44(0.52)	0.42(0.50)	0.48(0.50)	0.47(0.48)	0.48(0.46)
Wave B	σ_0 (kg/cm ²)	21.9(21.2)	18.6(19.9)	17.9(18.9)	13.1(13.4)	9.9(10.9)	7.9(7.8)	6.8(5.9)	3.3(3.5)	1.7(1.6)
	σ_1/σ_0	0.75(0.85)	0.85(0.84)	0.83(0.85)	0.90(0.89)	0.92(0.91)	0.96(0.95)	0.96(0.96)	1.0(1.01)	1.06(1.06)
	σ_2/σ_0	0.05(0.10)	0.07(0.11)	0.06(0.10)	0.15(0.15)	0.17(0.18)	0.16(0.22)	0.24(0.24)	0.29(0.30)	0.33(0.37)
	σ_3/σ_0	0.20(0.31)	0.23(0.32)	0.21(0.32)	0.26(0.30)	0.21(0.30)	0.29(0.29)	0.29(0.29)	0.39(0.29)	0.57(0.29)

()内計算値

(2) 三角波に対する応答

前項において、成分が既知である不規則なひずみ波形に対する応答を実測と計算によって求め、両者はよい一致を示すことが明らかにされた。ここではそれをさらに一歩進め、フーリエ級数に展開したとき定数項が表われないような不規則波を用い、実測と計算値の比較を試みた。

用いた波形は三角波であり、温度 5°C において周期を 0.1, 1, 10 秒と変化させて実験を行った。計算は三角波をフーリエ級数に展開し、30 項までを用いて近似させた。

両者の合致の程度をみるために、例として温度 5°C、

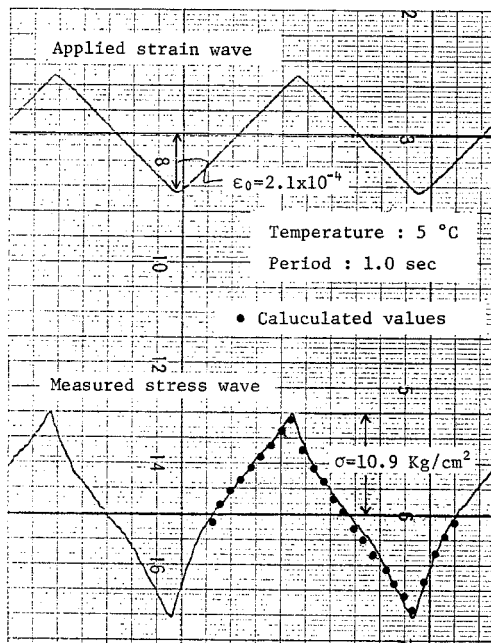


図-7 三角波に対する応答波形の実測と計算値

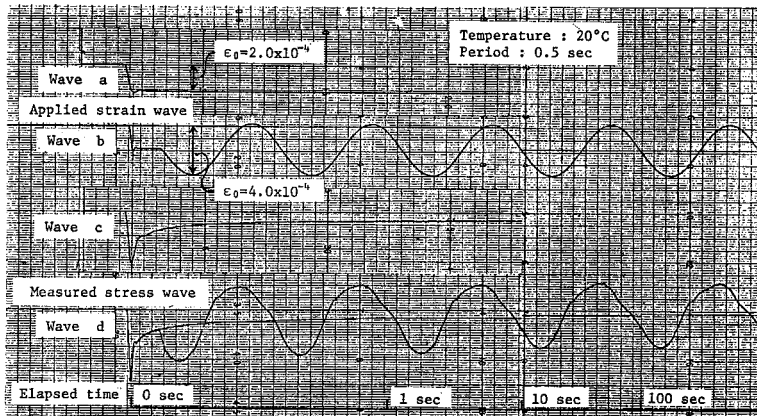


図-8 オフセットをもつ正弦波に対する応答波形の実測

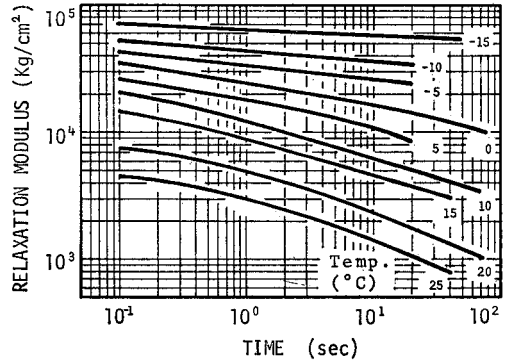


図-9 緩和弾性率と載荷時間の関係

周期 1 秒のときの実測波形上に計算値をプロットし、それを図-7 に示した。図をみるに、両者はほぼ一致していると判断してもさしつかえない。このことからフーリエ級数に展開したとき定数項が表われないような不規則波に対する応答は計算によって求めることができると結論されよう。

(3) オフセットをもつ正弦波に対する応答

一般に不規則波をフーリエ級数に展開したときには、初項すなわち定数項も表われてくる。ここではその定数項の取り扱いを明確にすることを試みている。

定数項は時間の関数ではないことから、一定のひずみが供試体に与えられていると考えるなら、その応答として示される応力は応力緩和曲線となるはずである。この考え方を確めるために、定数項に相当するオフセット量をもつ正弦波を入力し、その応答として示される応力波形を実験的に求めた。図-8 はその一例として温度 20°C における経過時間 10 秒までの応力波形を示したものである。なお、図中における波形 a は瞬時に一定ひずみを与えたものであり、その応答として示される応力緩和曲線は波形 c である。また、波形 a と正弦波とを合成した

ものが波形 b であり、それを入力としたときの応答として示された波形が d である。波形 d をみれば、波形 c の上に正弦波が載っていることが明らかである。

以上のことから、不規則なひずみ波形をフーリエ級数に展開したとき表われる定数項に対する応答は応力緩和曲線となることが明らかにされた。それゆえ、各温度における応力緩和曲線を求める必要があることから、温度 -15~25°C において 5°C ごとに瞬間載荷の応力緩和試験を行い、緩和弾性率・

時間曲線（図-9）を得た。なお、緩和弾性率-時間曲線はいうまでもなく、単位ひずみを与えたときの応力緩和曲線を両対数で示したものである。

5. 任意の不規則波に対する動的応答

前項までにおいては、不規則なひずみ波形が入力したとき、その応答として示される応力波形は入力波形をフーリエ級数に展開し、その級数の各項に対応した応力波形の成分を求め、それらを合成することにより求められることを、基本的な波形を用いて段階的な実験により検討した。

ここではさらに一步進めて、アスファルト混合物を用いた構造体に作用する外力を取り上げてみた。すなわち、道路舗装を対象としたときの Bell Shaped Wave、フィルダムのアスファルトセンターコアなどを対象としたときの地震波など、より複雑な任意の不規則波を用いて応力波形を計算により求めることができることを確認しようとするものである。

(1) Bell Shaped Wave に対する応答

車両がアスファルト舗装体の上を走行するとき、アスファルト層下面に生ずる半径方向ひずみは通常 Bell Shaped Wave とよばれている。ここでは温度 20°C および -10°C において、ピンボードにより Bell Shaped Wave を発生させ、それを周期 0.5 秒で供試体に入力

表-6 三角波を級数に展開したときの係数

n	ω (radian/sec)	t (sec)	a_n
0	0.0	0.0	2.67353E-01
1	6.283E+00	1.592E-01	-3.95472E-01
2	1.257E+01	7.958E-02	3.72228E-01
3	1.885E+01	5.305E-02	-9.66453E-02
4	2.513E+01	3.979E-02	-1.39676E-02
5	3.142E+01	3.183E-02	-1.47082E-03
6	3.770E+01	2.653E-02	5.87128E-03
7	4.398E+01	2.274E-02	2.13048E-03
8	5.027E+01	1.989E-02	-5.96270E-03
9	5.655E+01	1.768E-02	-6.47239E-03
10	6.283E+01	1.592E-02	5.41463E-03
11	6.912E+01	1.447E-02	1.63743E-03
12	7.540E+01	1.326E-02	-9.72687E-04
13	8.168E+01	1.224E-02	-1.74807E-03
14	8.796E+01	1.137E-02	3.18567E-03
15	9.425E+01	1.061E-02	-2.50955E-03
16	1.005E+02	9.947E-03	1.03281E-04
17	1.068E+02	9.362E-03	1.17166E-03
18	1.131E+02	8.842E-03	-1.14057E-04
19	1.194E+02	8.377E-03	4.00309E-04
20	1.257E+02	7.958E-03	-7.87573E-04
21	1.319E+02	7.579E-03	2.33472E-04
22	1.382E+02	7.234E-03	2.92569E-04
23	1.445E+02	6.920E-03	5.85490E-04
24	1.508E+02	6.631E-03	-6.43658E-04
25	1.571E+02	6.366E-03	-5.32615E-04
26	1.634E+02	6.121E-03	9.22258E-04
27	1.696E+02	5.895E-03	-9.06689E-04
28	1.759E+02	5.684E-03	5.45375E-04
29	1.822E+02	5.488E-03	-3.62993E-04

し、その応答として示される応力波形を経過時間 100 秒

まで実測した。図-10 はその例として各経過時間における応力波形を示したものである。なお、図中の応力波形の極大、極小値を $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ と名づけた。

図が示しているように、入力した Bell Shaped Wave は引張り側の最大値を中心に左右対称形をしており、かつ圧縮側の大きさも等しいにもかかわらず、応答として示される応力波形は軸対称とはならず、圧縮側の応力の大きさは異なり、 σ_1 に比較し σ_2 は大きな値を示している。この傾向は温度が高いほど顕著であり、-10°C という低温においては σ_1 と σ_2 の値はほぼ等しく弾性的挙動を示している。また、時間の経過とともに応力波形の引張りの最大値 (σ_0) は小さくなる傾向にあることがわかる。これは前項で述べたように Bell Shaped Wave をフーリエ級数に展開したときの定数項に対応

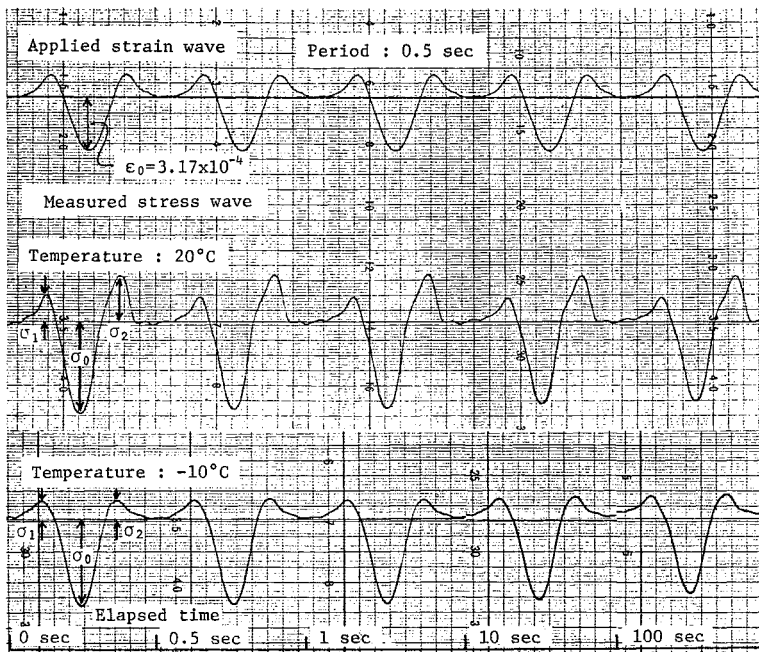
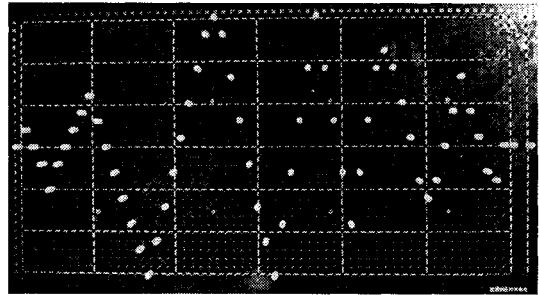


図-10 Bell Shaped Wave に対する応答波形の実測

表一七 Bell Shaped Wave に対する応答波形の
実測値と計算値の比較

Temperature (°C)		Elapsed time (sec)			
		0.1	1.0	10.0	100.0
20	σ_0 (kg/cm ²)	6.6 (6.1)	6.2 (5.7)	5.9 (5.7)	5.7 (5.6)
	σ_1/σ_0	0.29 (0.24)	0.29 (0.30)	0.29 (0.33)	0.32 (0.38)
	σ_2/σ_0	0.50 (0.51)	0.56 (0.56)	0.56 (0.60)	0.60 (0.63)
-10	σ_0 (kg/cm ²)	30.4 (28.2)	29.3 (27.7)	27.7 (27.2)	26.6 (26.5)
	σ_1/σ_0	0.22 (0.27)	0.24 (0.30)	0.27 (0.33)	0.32 (0.36)
	σ_2/σ_0	0.22 (0.30)	0.24 (0.32)	0.29 (0.34)	0.33 (0.38)

() 内計算値



写真一三 ピンボード上の不規則波形

した応力は緩和曲線となることからうなずける。

入力した Bell Shaped Wave の振幅の最大値を 1 とし、それをフーリエ級数に展開したときの係数 a_n (偶関数であるため $b_n=0$) を第 30 項までを表一六に示した。表をみるに、Bell Shaped Wave においては定数項はかなり大きな値を示していることから、応答として示される応力波形には応力緩和の影響がかなり表われてくることをものがたっている。角速度 ω と係数 a_n を用いて、各項に対応した応力波形の成分の振幅と位相角を求め、それら各成分を合成することにより応答として示される応力波形を求め、それらと実測値との比較を σ_0 の大きさ、 σ_1/σ_0 、 σ_2/σ_0 なる比を用いて行った。それらの値を表一七に示した。

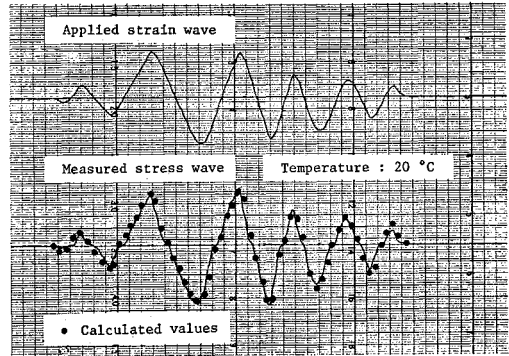
表をみるに、Bell Shaped Wave を入力としたときの応答として示される応力波形は、実測ならびに計算結果とも、軸対称とはならず圧縮側の応力の大きさは σ_1 より σ_2 の方が大きく、かつ時間の経過とともに σ_0 の値は小さくなる傾向にあることを示している。また、 σ_0 、 σ_1/σ_0 、 σ_2/σ_0 などの値は、 $|E^*|$ および ϕ の変動を考慮するとき、ほぼ一致しているとしてもさしつかえないと思われる。

以上のことから、Bell Shaped Wave が入力したときの応答として示される応力波形は計算により求められることが明らかとなった。

(2) 不規則波に対する応答

フィルダムのアスファルトセンターコアなどを対象としたときの地震波、もしくはその他種々の構造物に作用する不規則な荷重状態などを対象としたときの不規則波として、写真一三に示すようなピンボードにピンを差し込んで得た波形を用いて、温度 20°C において供試体に入力し、その応答として示される波形を直線書きペンレコーダーで記録したものを 図一11 に示した。

この入力した不規則波をフーリエ級数に展開し、20°C における $|E^*|$ および ϕ と ω との関係から各項に対応した応力の成分の振幅と位相角を求め、それらを合成することにより求めた応力波形を 図一11 と同一図上にプ



図一11 不規則波に対する応答波形の実測と計算値

ロットした。

図から、両者はほぼ一致していると判断してもよいと思われ、この種の不規則波による応答も、基礎的な動的データと数学的手法を用いて、計算により求めることができる結論される。

6. 結 論

本研究ではアスファルト混合物の動的応答の一般的な規則性を明らかにした。すなわち、アスファルト混合物に不規則なひずみ波形が入力したときその応答として示される応力波形を、温度および周波数を変化させ正弦波を用いて得られた複素弾性率 ($|E^*|$) および位相角 (ϕ) のデータを用い、入力波形をフーリエ級数に展開したときの各項のおののに対応する応力波形の成分を求め、それらを合成することにより求めることができることが明らかにされた。

7. あとがき

アスファルト混合物は近年道路舗装のみならず、その用途が拡大され、水工構造物にも利用されるようになりそれらを用いた構造物が数多く建設されているにもかかわらず、混合物の配合および厚さなどの決定は経験に頼らざるを得ず、合理的な設計法ならびに破壊に対する安

全性を理論的に検討する方法などはまったく確立されていない。

アスファルト混合物の破壊特性は環境条件（温度およびひずみ速度）に非常に敏感であり、その強さおよび限界ひずみの大きさは極端に異なることから、破壊に対する安全性の確認には、他の土木材料のように強さまたは許容ひずみのみを用いることはできず、常に応力とひずみの双方を取り入れなければならない。応力とひずみの双方を対象とするには弾性係数を介すればよいが、混合物のような粘弾性体のそれは温度および荷重時間の関数として示されることから、それらを正確に規定することができれば、ひずみから応力（またはその逆）を算出することができる。構造物を構成している、または付帯している混合物に作用する外力は一般に不規則なものであり、そこにおける荷重時間を明確にすることは非常に困難である。このことから安易に弾性係数を持ちこむことはできない。

本研究の成果を利用するならば、不規則な外力における荷重時間を明確に求めなくとも、不規則なひずみ波形が入力したときの応答として示される応力波形を基礎的

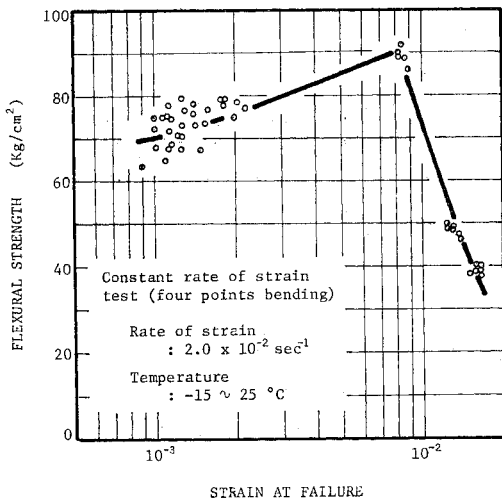


図-12 応力・ひずみ面および破壊包絡線

動的データと数学的手法を用いて求めることができることから、鋼床版上の舗装や混合物を用いた水工構造物などの応力状態を求め、構造体と混合物との相互作用を明らかにすることができるのではないかと考える。また、入力したひずみ波形の最大値 (ϵ_{max}) と計算により求めた応力波形における最大値 (σ_{max}) を図-12 (なお、これは曲げの場合の例であるが) に示すような応力・ひずみ面にプロットし、その座標点が破壊包絡線の³⁾の内側に位置するか否かにより、構造物を構成している混合物の破壊に対する安全性を検討することもできるのではないかと筆者らは考えている。

なお、本研究における実験ならびに計算にあたっては岡川秀幸、小野修史の両氏の協力を得たことに厚く感謝の意を表するものである。また、数値計算には北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-75 を使用した。

また、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) 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，1972.
- 2) 笠原 篤・土山和夫・菅原照雄：アスファルト混合物の静的性状と動的性状，石油学会誌，第 18 卷，第 5 号，1975.
- 3) 笠原 篤・上島 壮・菅原照雄：共振法によるアスファルトおよびアスファルト混合物の動的粘弾性，土木学会論文報告集，第 208 号，1972.
- 4) 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.
- 5) 笠原 篤・菅原照雄：アスファルト合材の動的応答に関する研究，土木学会北海道支部研究発表会論文集，第 28 号，1972.
- 6) 笠原 篤・岡川秀幸・菅原照雄：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への利用，土木学会論文報告集，第 254 号，1976.
- 7) Williams, M.L., Landel, R.F. and Ferry, J.D.: The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids, J. Am. Chem. Soc., 1957.
- 8) 森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げの破壊包絡線に関する研究，土木学会論文報告集，第 251 号，1976.

(1978.1.17・受付)