

アスファルト混合物の力学特性と構成材料の関係

THE DEPENDENCE OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SAND-FILLER-ASPHALT MIXTURES ON TEMPERATURE, RATE OF LOADING AND BULK DENSITY OF AGGREGATE

渡辺 隆* ・ 渡辺 暉彦** ・ 藤田 晃弘***
By Takashi WATANABE, Teruhiko WATANABE and Akihiro FUJITA

1. ま え が き

アスファルト混合物は道路舗装などに広く用いられており、その力学的性質については多くの研究者の関心の対象となっている。しかし、アスファルト混合物の力学的性質は温度、載荷時間、バインダーであるアスファルトの性質、骨材の配合などによって大きく変化するため、アスファルト混合物の力学的特性を少数の基本的データから予測するのは非常に困難である。本研究は、アスファルト混合物の力学的特性に及ぼす骨材配合やバインダー特性の影響を検討するために、実用されている混合物ではなく、比較的単純な配合のものについて実験的に検討を行ったものである。対象とした混合物は、砂・フィラー・アスファルトの混合物であり、これらに対して縦振動試験および一軸圧縮試験を実施した。その結果、縦振動試験における複素弾性率、一軸圧縮試験における一軸圧縮強度はともに混合物中の鉱物粒子の容積率に支配される部分と、バインダーの感温性、載荷速度依存性に大きく影響される部分とから構成され、これらの要素と混合物の力学的特性との間に簡単な関係のあることが見出された。すなわち、これらの変形抵抗や強度が鉱物粒子の容積率とバインダーの温度および載荷速度による特性との積によって求められるという実験的な関係が見出された。この種の関係が、供用されている混合物についても適用可能であるか否かはまだ不明であり、ここで用いた試験条件は実際の舗装体を受ける繰返し荷重下での曲げ応力状態とも異なるが、これらの条件を拡大一般化していけば、混合物の力学的特性を材料の配合から推定できる可能性があると考えられる。

2. 使用材料および供試体

アスファルト混合物の配合を単純化するために、骨材としてはフィラーと、0.3~0.6 mm にふるいわけた単粒砂だけを用い、両者の混合比を数種類変えている。アスファルト量は 20°C における一軸圧縮強度を最大にするものを選び、本論文ではこれを最適アスファルト量とよぶ。使用した材料とその性質を表-1 に、配合を表-2 に示す。

縦振動試験に使用した砂と一軸圧縮試験に使用した砂とは産地が異なっているが、粒径は両者ともふるいにかけて同じものとした。図-1 はフィラー量と最適アスファルト量との関係を体積比で表わしたものである。砂とフィラーそれぞれに最適アスファルト膜厚があり、両者の混合比が変化してもそれぞれの最適膜厚が変わらないとすると、この関係は直線で表わされ、このとき骨材に付着しているアスファルト膜は厚さ数ミクロン程度の固体的な膜を形成していると考えられている¹⁾。図-1 において、一軸圧縮試験に使用した供試体のアスファルト

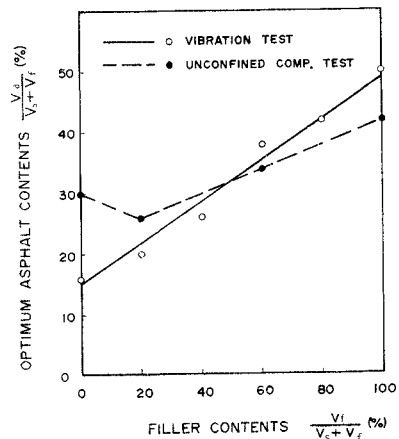


図-1 フィラー量と最適アスファルト量の関係

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科
*** 正会員 名城大学助手 理工学部土木研究室

表-1 使用材料とその性状

	アスファルト				フィラー		砂		
	比重	針入度	軟化点	PI	比重		比重	産地	粒径
振動試験	1.03	90	45.5°C	-0.95	2.70		2.70	相模川	0.3~0.6 mm
圧縮試験	1.03	67	48.2°C	-0.97	2.71	CaCO ₃ 粉末	2.60	富士川	

表-2 使用した供試体の配合 (単位はすべて%)

縦振動試験					一軸圧縮試験				
容積比		重量比		骨材充填率	容積比		重量比		骨材充填率
フィラー量	アスファルト量	フィラー量	アスファルト量	P	フィラー量	アスファルト量	フィラー量	アスファルト量	P
$\frac{V_f}{V_s+V_f}$	$\frac{V_a}{V_s+V_f}$	$\frac{W_f}{W_s+W_f}$	$\frac{W_a}{W_s+W_f+W_a}$	$\frac{V_s+V_f}{V_f}$	$\frac{V_f}{V_s+V_f}$	$\frac{V_a}{V_s+V_f}$	$\frac{W_f}{W_s+W_f}$	$\frac{W_a}{W_s+W_f+W_a}$	$\frac{V_s+V_f}{V_f}$
0	16	0	5.76	53.8	0	30	0	10.6	51.7
20	20	20	7.09	61.3	20	26	20.7	8.96	60.0
40	26	40	9.03	67.9	—	—	—	—	—
60	38	60	12.6	70.5	60	34	61.0	11.6	71.3
80	42	80	13.8	68.3	—	—	—	—	—
100	50	100	16.0	65.2	100	42	100	13.8	67.2

V_s : 砂の体積, V_f : フィラーの体積, V_a : アスファルトの体積, V_T : 空隙も含めた供試体の全体積, W_s : 砂の重量
 W_f : フィラーの重量, W_a : アスファルトの重量

量を見ると、砂だけの供試体の最適アスファルト量が直線からはずれている。これは骨材の骨格構成がフィラー量の多いところと少ないところで異なることによると考えられるが、砂とアスファルトだけの混合物についてはアスファルト量の変化に対する一軸圧縮強度の変化が鋭敏でないことによる²⁾。すなわち、砂とアスファルトだけの混合物ではアスファルト量が少々変化しても一軸圧縮強度はほとんど変化しない。

材料の混合にはミキサを用い、混合温度 150°C、混合時間 5 分とした。これを径 5 cm の円筒形モールドに詰め、120°C で上下両面に 1 ton (50 kg/cm²) の荷重を静的に加えて締固めた。この締固めは手動の油圧ジャッキで行い、最大荷重 1 ton で 3 ないし 4 秒間加圧した。なお供試体の高さは 10 cm である。また本論文で骨材充填率というのは、供試体全体積中に砂とフィラーが占める容積比のことであり、この値も表-2 に示されている。

3. 縦振動試験

(1) 試験方法

粘弾性体を振動させると粘性項の影響によって応力とひずみの間に位相のずれを生じる。この位相ずれを含めた形の複素弾性率 E^* を採用すれば、応力 σ とひずみ ϵ の関係は

$$\sigma = E^* \epsilon \dots\dots\dots (1)$$

となる。これはフックの弾性式とニュートンの粘性式を 1 つにまとめたものと考えられる。ここで用いた縦振動試験装置は図-2 のようなもので、円筒形の供試体の下

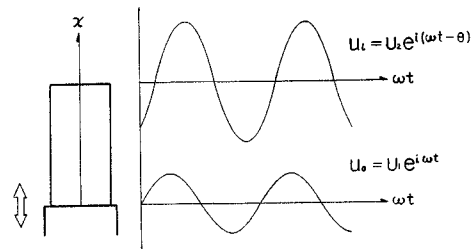


図-2 縦振動試験装置の概要

端に $u_0 = U_0 e^{i\omega t}$ なる強制変位を与えたときの供試体上端の変位 $u_l = U_l e^{i(\omega t - \theta)}$ を測定するものである。ただし ω は強制角振動数 (rad/s) である。x を供試体に固定した座標とすれば、この変位 u は

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{gE^*}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (2)$$

なる一次元波動方程式で与えられる。ただし g は重力加速度、r は供試体の単位体積重量である。この試験装置は応力とひずみを直接求めるものではなく、 U_1, U_2, θ を測定して式 (2) から間接的に E^* を求めるものである。強制変位 U_1 の大きさは 10⁻⁴ mm 程度で、上端の振動倍率が 10 倍としてもひずみは 10⁻⁵ 程度でしかない。測定振動数範囲は位相差 θ の読み取れる範囲で決まり、500~5000 Hz. の間で測定を行った。供試体全体が恒温気槽中に入っており、試験温度は -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60°C の 8 段階とした。

(3) データの解析

図-3 は縦振動試験結果の一例で、複素弾性率の絶対値 $|E^*|$ と強制角振動数 ω との関係を図対数座標にプロットしたものである。アスファルト混合物の $|E^*|$ は温

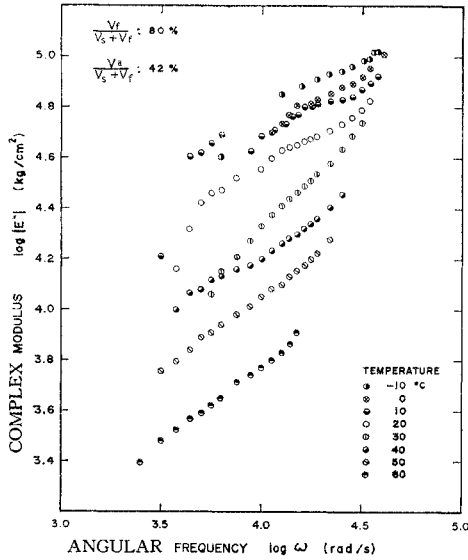


図-3 アスファルトモルタル（フィラー量80%）の複素弾性率と強制角振動数の関係（両対数座標）

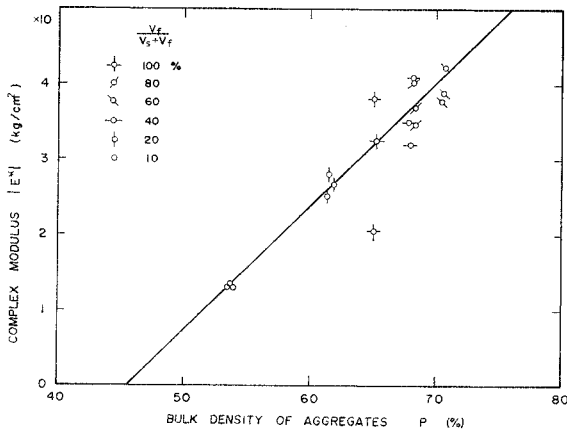


図-4 20°C, ω=10⁴rad/sにおける複素弾性率と骨材充填率の関係

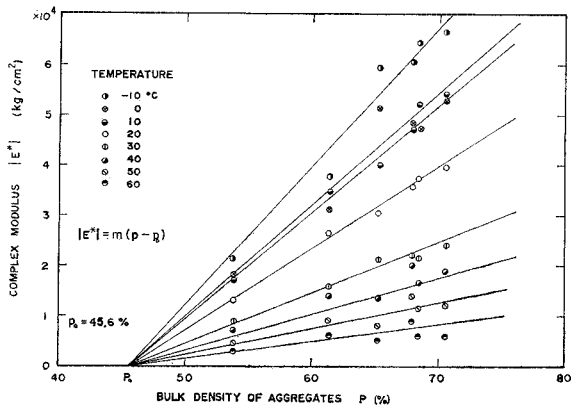


図-5 ω=10⁴rad/sにおける複素弾性率と骨材充填率の関係（-10~60°C）

度、周波数、骨材配合、バインダーの粘度や量によって変化するが、ここではまず骨材配合によって $|E^*|$ がどのように変化するかを調べた。図-4 に温度 20°C, $\omega = 10^4 \text{ rad/s}$ における $|E^*|$ と骨材充填率 P との関係を示した。一種類の配合につき3個ずつの供試体を用いて測定しており、ばらつきはかなりのあるが、ほぼ直線的な関係を示している。その他の温度における測定値についても同様なことがいえ、おのおのの平均値をとってまとめて示したのが図-5 である。注目されることは、これらの直線の傾きは温度が高くなるほど小さくなるが、すべての直線が $|E^*|=0$ で同じ横座標 $P_0=45.6$ (%) をもつことである。この P_0 を限界充填率と名づける。以上

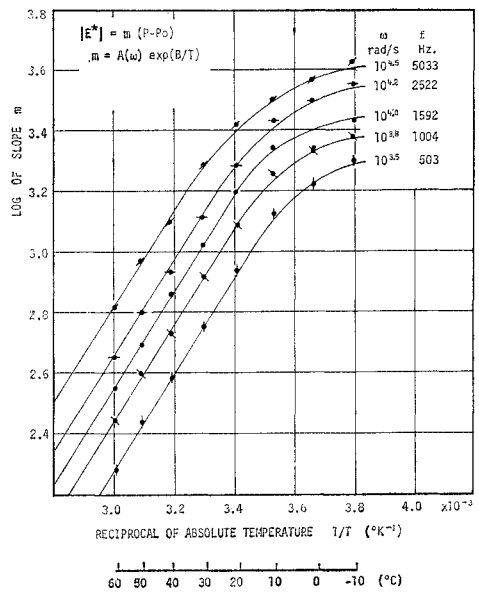


図-6 図-5 の直線の傾き m の対数と絶対温度 T の逆数との関係

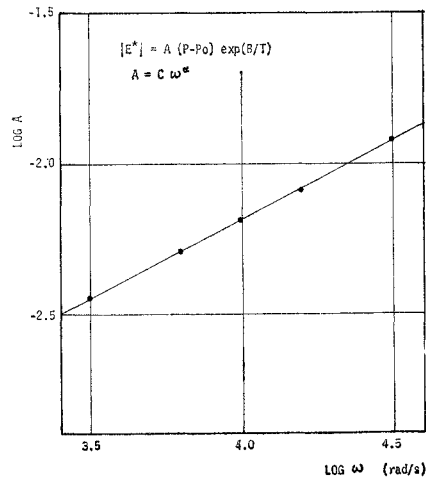


図-7 $|E^*|$ を求める実験式中の定数 A と強制角振動数 ω との関係（両対数座標）

の関係は他の振動数においても成立し、同じ値の P_0 が得られた。これらの直線の傾きを m とすれば、 $|E^*|$ と P との関係は

$$|E^*| = m(P - P_0) \dots\dots\dots (3)$$

と表わすことができ、 m は温度と振動数の関数である。この傾き m と温度との関係を調べるために $\log m$ と絶対温度の逆数 $1/T(^{\circ}K^{-1})$ との関係をプロットしたのが図-6 である。他の振動数における結果も同時に示したが、いずれも $10^{\circ}C$ 以上の温度では直線的な関係があり

$$m = Ae^{B/T} \quad (T \geq 283^{\circ}K) \dots\dots\dots (4)$$

が成立し、 A は強制角振動数 ω の関数である。 A と ω の関係を両対数座標にプロットすると図-7 のようになり

$$A = C\omega^{\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

が成立する。式 (3), (4), (5) から E^* を求める実験式

$$|E^*| = C(P - P_0)\omega^{\alpha}e^{B/T} \quad (T \geq 283^{\circ}K) \dots\dots (6)$$

が得られる。定数 C, B, P_0, α の値は表-3 に掲げる。

4. 一軸圧縮試験

(1) 試験方法

10 ton 電動式万能圧縮試験機を用い変位速度を一定にして一軸圧縮試験を行った。使用した変位速度は 3, 15, 60 mm/min の 3 種である。供試体の高さは 100 mm であるからひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に換算すれば、それぞれ 5.0×10^{-4} , 2.5×10^{-3} , $1.0 \times 10^{-2} s^{-1}$ となる。試験温度は $-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60^{\circ}C$ の 9 段階である。ただし、フィラー量 0% の供試体は $-20^{\circ}C$ と $60^{\circ}C$ における試験が欠落している。荷重の検出には容量 10 ton, 2 ton, 500 kg, 100 kg の 4 種のロードセルを用意し、供試体の強度に応じて使いわけた。変位速度が一定なので、応力の変化を XT レコーダに記録させれば、応力-ひずみ曲線が得られる。

(2) データの解析

振動試験で求められる複素弾性率との関連から、一軸圧縮試験においても変形抵抗を表わすファクターであるスティフネス $F(l) = a/\epsilon$ を求めることが望ましい。しかし、レコーダに描かれた応力-ひずみ曲線を見ると、図-8 のような立ち上がり部分の現われ方が供試体ごとに異なり、得られるひずみ値は大きくばらつく(図-17 参照)。それに伴ってスティフネスのばらつきも大きく解析は困難であった。そこで、今回は

最大一軸圧縮応力 σ_b について解析してみた。これは最大荷重を供試体の初期断面積で除して求めたものである。縦振動試験の結果にならない、温度、ひずみ速度を一定としたとき、最大一軸圧縮応力 σ_b が骨材充填率 P によってどう変化するかを調べた。図-9 はひずみ速度 $1.0 \times 10^{-2} s^{-1}$ 、温度 $20^{\circ}C$ における例であるが、 σ_b と P

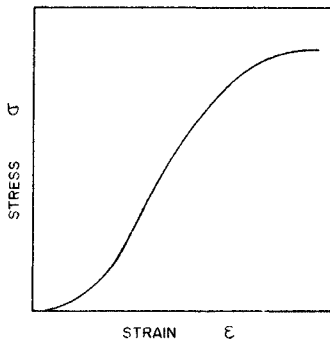


図-8 一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線

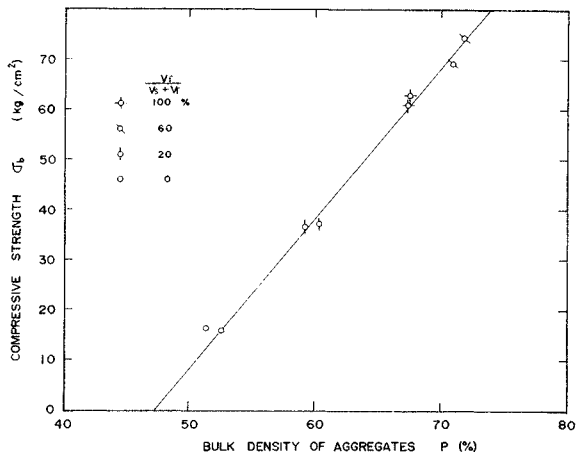


図-9 温度 $20^{\circ}C$ 、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-2} s^{-1}$ における最大一軸圧縮応力と骨材充填率の関係

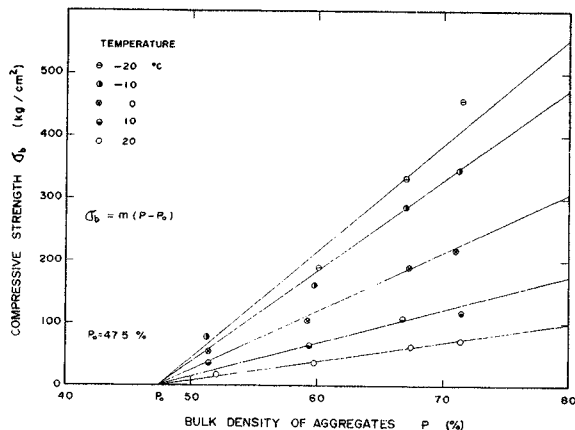


図-10 ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-2} s^{-1}$ における最大一軸圧縮応力と骨材充填率の関係 ($-20 \sim 20^{\circ}C$)

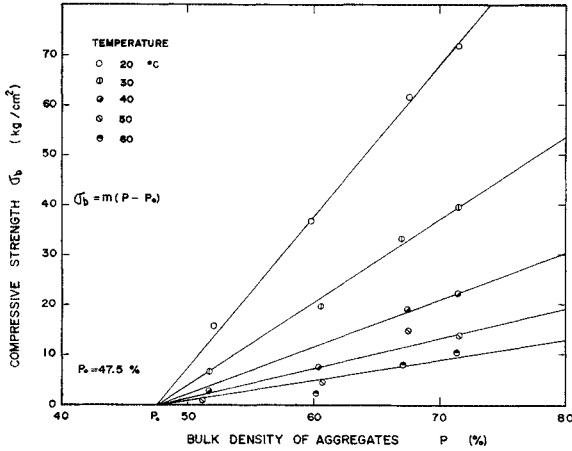


図-11 ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ における最大一軸圧縮応力と骨材充填率の関係 (20~60°C)

との関係が直線的であることを示している。この直線関係は他の温度、ひずみ速度における結果についてもいえ、図-10、図-11 にひずみ速度 $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ における結果をまとめて示した。図が見にくくなるので、図-10 に 20°C 以下の温度における結果を、図-11 に 20°C 以上での結果を別にして掲げた。ただし、各点は 2 個ずつの供試体の試験結果の平均値である。縦振動試験の結果と同じように、すべての直線が P 軸上の点 P_0 を通り、傾きが温度によって変化する。この限界充填率 P_0 は、他の 2 つのひずみ速度における試験結果についても同じ値が得られ、 $P_0 = 47.5\%$ であった。これらの直線の傾きを m とすれば、最大一軸圧縮応力 σ_b と骨材充

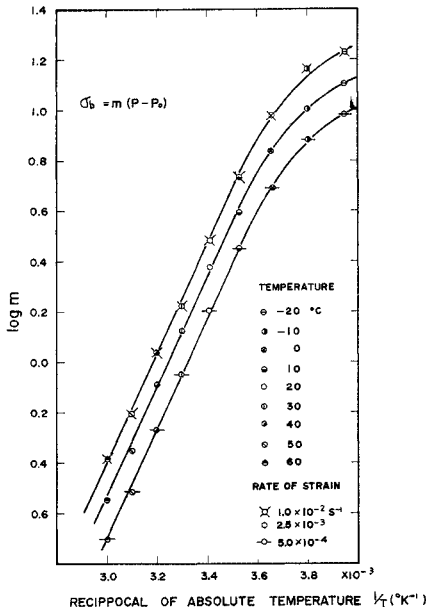


図-12 図-10、図-11 の直線の傾き m の対数と絶対温度 T の逆数との関係

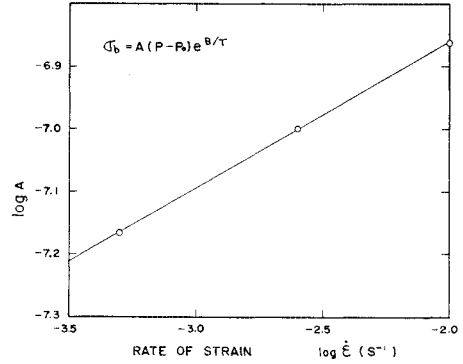


図-13 σ_b を求める実験式中の定数 A とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係 (両対数座標)

表-3 実験式中の諸定数の値

EXPERIMENTAL EQUATION	C	B	P_0	α
$ E^* = C(P - P_0)\dot{\epsilon}^\alpha e^{B/T}$	4.79×10^4	3638	45.6	0.533
$\sigma_b = C(P - P_0)\dot{\epsilon}^\alpha e^{B/T}$	4.01×10^7	4964	47.5	0.233

填率 P との関係は

$$\sigma_b = m(P - P_0) \dots \dots \dots (7)$$

で表わされる。図-12 は $\log m$ を絶対温度の逆数 $1/T$ ($^\circ\text{K}^{-1}$) に対してプロットしたものである。3 種のひずみ速度について得られた結果を同時に示したが、10°C 以上の温度に対しては平行な直線で表わされ

$$m = Ae^{B/T} \quad (T \geq 283^\circ\text{K}) \dots \dots \dots (8)$$

が成立する。定数 A はひずみ速度とともに変化するが、 B は変化しない。次に、この定数 A とひずみ速度との関係を調べるために、両者の対数をとってプロットすると、図-13 のように直線関係が得られ

$$A = C\dot{\epsilon}^\alpha \dots \dots \dots (9)$$

が成立する。 C, α は定数である。式 (7), (8), (9) から σ_b を求める実験式

$$\sigma_b = C(P - P_0)\dot{\epsilon}^\alpha e^{B/T} \quad (T \geq 283^\circ\text{K}) \dots \dots \dots (10)$$

が得られる。定数 C, B, P_0, α の値を振動試験の結果とともに表-3 に掲げる。

5. 考 察

ここで得られた実験式について重要なことは、砂・フイラー・アスファルトだけの単純な配合の混合物では、その力学的性質が骨材に影響される部分とバインダーに影響される部分とに分かれていることである。

これらの実験式において骨材充填率 P が 100% になれば、 $|E^*|$ あるいは σ_b はある特定の値を持ち、しかもそれらの値は温度に依存するようになるが、これらの式はあくまでも、アスファルト膜が最適アスファルト量という特定の状態で骨材に付着している場合にのみ成立する式であるから、骨材充填率が 100% になることはあ

り得ない。また、 $P=P_0$ になれば、 $|E^*|=0$ 、あるいは $\sigma_b=0$ となるが、このような状態も存在しない。そのときは骨材の一つ一つが遊離して力学的な抵抗を示すことはできないと考えられる。

P_0 の値は縦振動試験については 45.6%、一軸圧縮試験については 47.5% という値が得られたが、メスシリンダー中に砂をゆるく詰めたときの充填率を求めると表-4 のような結果が得られた。砂をゆるく詰めるのはあまり容易でなく、メスシリンダーの目盛を読むという操作も大まかなものであるが、振動試験用の砂では水中での疎充填が 45.5% となり P_0 に近い値を示す。一軸圧縮試験用の砂では疎充填が 45.1% で、 $P_0=47.5\%$ とはいくらか異なり、この差がひずみレベルに依存するものか、単なる実験誤差であるかは今のところ断言できないが、 P_0 は骨材が噛み合い抵抗力を発揮できる最小限の充填率であると考えられる。振動試験に使用したものと圧縮試験に使用したものとでは材料が異なっているのが残念であるが、今後同じものを用いて比較していく予定である。

表-4 砂の疎充填率

	比 重	実験条件	疎充填率(%)
振動試験に使用した砂	2.70	空 気 中	48.2
		水 中	45.5
圧縮試験に使用した砂	2.60	空 気 中	45.1
		水 中	45.2

$T=283^{\circ}\text{K}(10^{\circ}\text{C})$ 以上の温度に対しては $|E^*|$ も σ_b も $e^{B/T}$ なる量に比例しているが、アスファルトの粘度もある範囲の温度内では $e^{B/T}$ に比例することが知られている^{3),4)}。アスファルト混合物の力学的特性が温度に依存することは、バインダーであるアスファルトの温度依存性に起因するものであるから、この項がアスファルトの性質によるものであることは明らかであるが、バインダーの種類を変えたときに、ここに提案した実験式中の諸定数がどう変化するかをつきとめることが今後の課題である。また、骨材に付着しているアスファルト膜の厚さは数ミクロンのオーダーであり、固体的な状態にあると考えるのが自然であるが¹⁾、通常のアスファルトの粘度を求めるには massive な状態で測定されている。今後はアスファルト薄膜の力学的特性を独立に調べて、これらの結果とアスファルト混合物の力学的性質との関連を検討する必要がある。

次に、 σ_b を表わす実験式 (10) に ε^{α} という因子があるが、これについて考察する。式 (10) の両辺の対数をとると、

$$\log \sigma_b = \log C(P-P_0) + \frac{B}{T} \log e + \alpha \log \varepsilon \dots\dots\dots(11)$$

となる。したがって $\log \sigma_b$ と $\log \varepsilon$ との関係のプロットすれば、骨材充填率 P および温度 T が一定なら傾き α の直線が得られることになる。温度 T_0 を基準温度とすれば、温度 T における直線は、 T_0 における直線を $B \log e \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$ だけ $\log \sigma_b$ 軸に沿って平行移動したものとなる。これから $\log \varepsilon$ 軸に沿った平行移動に用いられるシフトファクター a_T を導いてみよう。直線の傾きが α であるから

$$B \log e \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) / \log a_T = \alpha \dots\dots\dots(12)$$

すなわち、

$$\log a_T = \frac{B \log e}{\alpha} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \dots\dots\dots(13)$$

となる。これをさらに変形して

$$\log a_T = \frac{-\frac{B \log e}{\alpha T_0} (T - T_0)}{T_0 + (T - T_0)} \dots\dots\dots(14)$$

とすれば WLF 式⁵⁾

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_S)}{C_2 + (T - T_S)} \dots\dots\dots(15)$$

と形の上では同じになる。ただし T_S はガラス転移温度より約 50°C 高い基準温度で、 C_1, C_2 は定数である。無定形高分子材料に対する WLF 式の定数 $C_1=8.86, C_2=101.6$ に式 (14) の定数を合わせることはできないが、式 (14) が、砂やフィラーも含んだアスファルト混合物から導かれたものであれば、このことは当然であろう。また、縦振動試験における結果式 (6) から、まったく同様に、 $|E^*|$ に関するシフトファクターが式 (14) と同じ形で導かれる。式 (14) において、規準温度を 20°C 、すなわち $T_0=293^{\circ}\text{K}$ とすると、圧縮試験については、

$$\log a_T = \frac{-31.6(T - 293)}{293 + (T - 293)} \dots\dots\dots(16)$$

縦振動試験については

$$\log a_T = \frac{-10.1(T - 293)}{293 + (T - 293)} \dots\dots\dots(17)$$

となり、これらを用いて実験から得られた $\log \sigma_b$ vs. $\log \varepsilon$ および $\log |E^*|$ vs. $\log \omega$ のプロットをシフトし

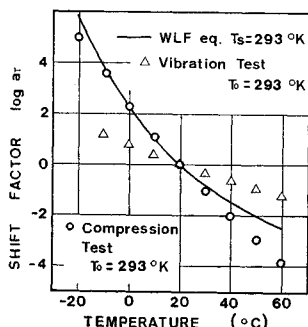


図-14 シフトファクターと温度の関係

てみた。ただし骨材配合が変わってもシフトファクターは変わらないとしている。図-14 は $\log a_T$ と温度との関係である。図中の各点は式 (16), (17) から求めた値であり、実線は WLF 式において $T_s=293^\circ\text{K}$ としたものである。式 (16), (17) は σ_b あるいは $|E^*|$ が $e^{B/T}$ に比例することから導かれたものであり、この関係は 0°C 以下では成立しなかったから、式 (16), (17) も 0°C 以下では成立しないのであるが、図-14 では -20°C まで成立するとして計算した。

図-15 はこのシフトファクターを用いて、2種類のアスファルト混合物の $|E^*|$ を ωa_T に対して両対数座標にプロットしたもので、図-16 は、同様に、 $\log \sigma_b$ を $\log \dot{\epsilon} a_T$ に対してプロットしたものである。実際には、縦振動試験における強制角振動数(載荷速度)を $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{ rad/s}$ の間にとって測定を実施したのであるが、このような時間温度換算則を用いることによって、 20°C において強制角振動数が $10^2 \sim 5 \times 10^4 \text{ rad/s}$ の間で試験を行ったような結果が得られる。このようにアスファルト混合物が熱レオロジ的単純性を示すことはすでに多くの研究者によって報告されており^{6), 7), 8)}、種々の温度での測定値が載荷速度あるいは載荷時間軸に沿ってシフトされた結果、滑らかな線に連なるならば、一つの基準温度での広い載荷速度あるいは時間における測定結果とみなして差し支えない。このようなことは、ふつう、線形粘弾性理論が適用され得る微小なひずみ領域のところで成立するとされているが、線形性を期待できないような大きなひずみのところでも同様な手法を用いて作図したのが図-16 である。無定形高分子材料の引張り強度についてこの時間温度換算則が成立すると報告している例もあり¹⁰⁾、図-16 では種々の温度での測定値が、シフトされた結果一つの滑らかな線上に並び、破壊時の力学特性にもシフトファクターの概念が適用できることを示している。図-15 では式 (14) の成立しない低温部において測定点が滑らかにつながらない。図-15, 16 には式 (6), (10) において $T=293^\circ\text{K}$ (20°C) を代入して得られた直線も記入しておいた。

骨材充填率は、今回使用した供試体の中で、フィラー量 60% のものが最大で約 71%, フィラー量 0% のものが最小で約 52% である。図-16 では骨材充填率の大きなものはほぼこの直線上にあり、小さいものは直線からかなりはずれている。ここには示さなかったが、他の2種の配合のものとおわせて考えると骨材充填率の大きいものほど直線に一致する。ただし、 0°C 以下になると

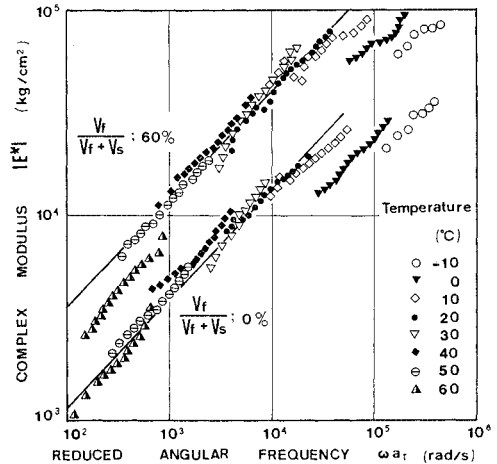


図-15 複素弾性率の角振動数に対するマスターカーブ：基準温度 20°C (両対数座標)

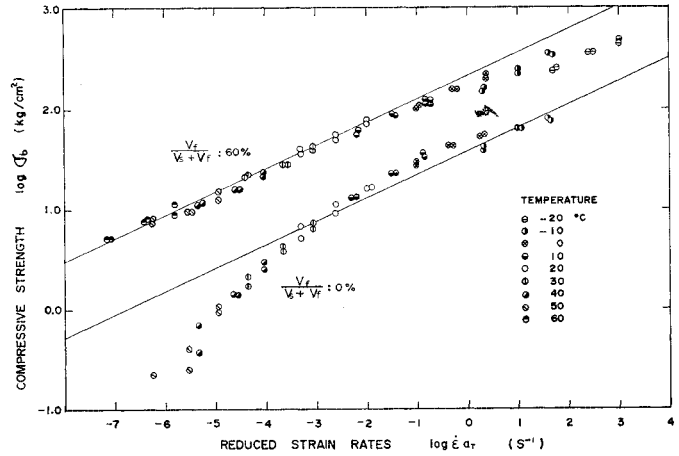


図-16 一軸圧縮強度のひずみ速度に対するマスターカーブ：基準温度 20°C (両対数座標)

実測値は直線からはずれてやや小さくなっていく。一方、図-15 では低温部を除くと直線によく適合している。このような直線関係が成立するのはある範囲内の載荷速度内でのことであり、載荷速度が非常に小さくなれば、材料は完全弾性体に近づき瞬間弾性率に漸近していくか、あるいは衝撃的な応力に近づいていく。また載荷速度が長くなれば圧縮強度の方は不明であるが、複素弾性率のマスターカーブは完全粘性体を表わす傾き 1 の直線に漸近するか、あるいは平衡弾性率を示して水平な直線となる⁹⁾。

図-17 はフィラー量 60% の供試体の破壊時のひずみ ϵ_b を、同じシフトファクターを用いて $\log \dot{\epsilon} a_T$ に対してプロットしたもので、他の配合のものについても同様な図が得られる。図-17 では破壊時のひずみにピークが見られ、このピークの両側で破壊の様式が異なると

考えられる。このピークの得られる温度が 10°C 付近であり、 30°C 以上では斜めにすべり線の入るせん断破壊、 0°C 以下の温度では脆性的な破壊、 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ では樽型にふくらむ中間的な破壊をすること、また、図-6、図-12において直線が曲がり始める温度が 10°C 付近であることなど合わせて考えれば、バインダーのガラス転移と関係があるようでもあり興味深い。

6. ま と め

本研究は最適アスファルト量をもつ砂・フィラー・アスファルト混合物の複素弾性率および一軸圧縮強度の骨材充填率依存性、感温性、載荷速度依存性について簡単な実験式を提案したものである。縦振動試験と一軸圧縮試験とはそのひずみ量が大幅に異なり、前者では骨材の相対的な移動がほとんどないのに対し、後者は破壊時の力学特性である。それにもかかわらず、両者の結果を同じ形の式で表わすことができ、しかも骨材配合の異なるものでも一様に1つの式によって表現することができた。この式の特徴について要約すると以下の通りである。

(1) 骨材が骨格を形成するのに必要な最小限の限界充填率が存在し、複素弾性率および一軸圧縮強度は供試体の骨材充填率と限界充填率との差に比例する。

(2) 複素弾性率も一軸圧縮強度も温度が高くなると小さくなるが、 10°C 以上の温度では絶対温度を T とすると $e^{B/T}$ (B は定数) に比例し、これはバインダーの影響によるものであると考えられる。

(3) ある範囲内の載荷速度では、複素弾性率は強制角振動数を ω とすると ω^{α_1} に比例し、一軸圧縮強度はひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ とすると $\dot{\epsilon}^{\alpha_2}$ に比例する (α_1, α_2 は定数)。

(4) これらの実験式から、時間温度換算則に用いられるシフトファクターを導くことができ、WLF 式と同じ形の式で表現できる。

ここにあげた実験式は、骨材充填率 $50\sim 70\%$ 、温度 $10\sim 60^{\circ}\text{C}$ 、周波数 $500\sim 5000\text{ Hz}$ 、ひずみ速度 $5.0\times 10^{-4}\sim 1.0\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ という比較的狭い範囲で直線近似を行った結果導かれたものであり、その適用範囲には限界がある。これらの条件を拡大して、これらの実験式の適用範囲を確かめる方向で、現在検討中である。

謝 辞 本研究における縦振動試験の大部分は昭和47年度卒業研究として内藤誠二郎君によって行われた

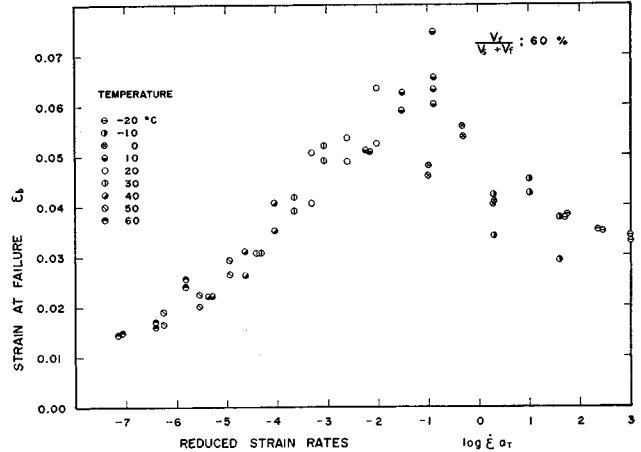


図-17 破壊時ひずみのひずみ速度に対するマスターカーブ：基準温度 20°C

ものである。また実験には小坂寛巳君、鈴木満君の協力を得、さらに日本大学 阿部頼政講師に御討議をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

なおこの研究には文部省科学研究費の交付を受けた。

参 考 文 献

- 1) Watanabe, T., Abe Y.: Special Characteristics of Thin Asphalt Films in Filler-Asphalt and Sand-Filler-Asphalt Mixes, Technical Report No. 9, pp. 25-45, Department of Civil Eng., Tokyo Inst. of Tech., Dec. (1970) (in English); Symposium "The Science of Asphalt in Construction" pp. D74-D88 American Chemical Society, Div. of Petroleum Chemistry; Los Angeles, March 1971.
- 2) 渡辺 隆・阿部頼政：アスファルト薄膜の特異性，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 7, pp. 111-123, 1969年11月。
- 3) 中島昭雄・上島 壯：舗装用アスファルトの粘度-温度関係，石油学会誌，第16巻，第4号，pp. 303-308, 1973.
- 4) Alfrey, T. Jr.: Mechanical Behavior of High Polymers, Interscience Publishers, New York, 1948.
- 5) Ferry, J.D. 著，祖父江監訳，村上・高橋共訳：高分子の粘弾性，東京化学同人，1964.
- 6) Pagen, C.A.: Rheological Response of Bituminous Concrete, Highway Research Record No. 67, pp. 1-26, 1965.
- 7) Dobson, G.R.: The Dynamic Mechanical Properties of Bitumen, Proc. Assoc. Asphalt Paving Tech. Vol. 38, pp. 123-139, 1969.
- 8) Ohmach, T., Watanabe T.: On the Dynamic Characteristics of Asphalt Mixtures, Proc. JSCE No. 203, pp. 103-112, July 1972.
- 9) Tobolsky, A.V. 著，村上・高橋・中村共訳：高分子の物性と構造，東京化学同人，1960.
- 10) Smith, T.L.: Dependence of the Ultimate Properties of a GR-S Rubber on Strain Rate and Temperature, Journal of Polymer Science Vol. 32, pp. 99-113, 1958.

(1974.6.29・受付)