

V-117 アスファルト混合物の動的特性について

東京工業大学 正員 渡辺 隆

東京大学 学生員 ○大町達夫

1. はじめに

アスファルト混合物の力学的特性は、温度や載荷時間に大きく左右されるため、粘弾性論を用いての研究が多くなされてきた。その際、数式的表現を簡単にするために、数個の模型で混合物を近似する方法や、忠実に力学的挙動を再現するために無限個の模型で近似する方法^{(1),(2)}などがとられてきたが、共に種々の難点が指摘されている。本文は、アスファルト混合物の粘弾性的特性を十分に且つ簡潔に表わし得ると思われる一つの尺度を提案し、その観点からアスファルト混合物の曲げ振動実験の結果に考察を加えたものである。

2. 実験方法および計算方法

加熱混合したアスファルト材で約 $4 \times 10 \times 40$ cmの矩形梁を圧縮成型する。これを振動台上に直立固定し、図-1に示すように片持梁として下端を強制振動する。加振振幅は、線形性が成立すると思わせる範囲の 0.09 mmであり、振動数を $25 \sim 60$ Hz、温度を $0 \sim 45^\circ\text{C}$ と変化した。

振動時の梁中の応力 $\sigma(t)$ とひずみ $\epsilon(t)$ とは、共に正弦的に変化するが同位相にはない。そこで図-2の如く

$$\sigma(t) = E^*(i\omega)\epsilon(t) = |E^*| e^{i\delta} \epsilon(t) \quad \text{..... ①}$$

ここで $E^*(i\omega)$; 複素弾性率

$|E^*| = |\sigma(t)| / |\epsilon(t)|$; 複素弾性率の絶対値 [kg/cm^2]

δ ; 応力とひずみとの位相差[rad.]

と置くと、振動台の変位 y_0 が

$$y_0(t) = |y_0| \cos \omega t \quad \text{..... ②}$$

であるとき、自由端の相対変位 $y(t)$ は

$$y(t) = \frac{1.57 |y_0| \frac{\omega^2}{p^2}}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{p^2})^2 + \tan^2 \delta}} \cos(\omega t - \theta) \quad \text{..... ③}$$

$$\text{ここで } \tan \theta = \frac{\tan \delta}{1 - \frac{\omega^2}{p^2}}, \quad p = (1.875)^2 \sqrt{\frac{E' I g}{\gamma A l^3}} \quad \text{..... ④}$$

γ ; 単位体積重量 [kg/cm^3]

A ; 断面積 [cm^2]

I ; 断面二次モーメント [cm^4]

E' ; 貯蔵弾性率(図2参照) [kg/cm^2]

となる。ただし③においては二次以上の振動の影響を無視した。

実験に際しては、梁の上下端にとりつけに加速度計より、振動倍率 $F = |y|/|y_0|$ 、変位の位相差 θ および振動数 ω が測定

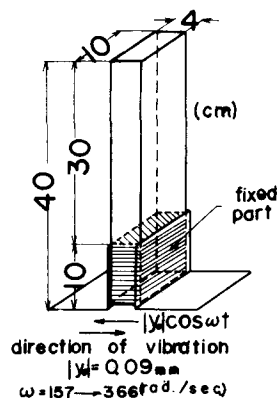


図-1 実験条件

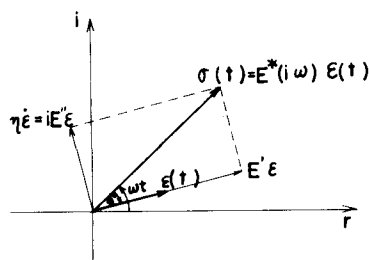


図-2 振動時の応力とひずみ
および複素弾性率

可能であるから③, ④を変形した次式, 即ち

$$\tan \delta = \frac{1.57 \sin \theta}{F + 1.57 \cos \theta}, \quad E' = |E^*| \cos \delta = 1.67 \frac{W}{I} \left(1 + \frac{1.57}{F} \cos \theta \right) \quad \dots\dots ⑤$$

ここで W : 供試体の全重量 [kg]

を用いて, 合材の $|E^*|$ および δ を算出しこれらが温度 T や振動数 ω によって変化する様子を調べた。

3. 時間・温度重ね合わせの原理の適用

実験は表-1に示す計24種類の単粒混合物について行なったが, 一例としてF70の混合物即ちアスファルトの針入度80/100, アスファルト量 $V_{As}/V_F = 70\%$ (フィラー+アスファルト)混合物について考察を進めて行く事にする。

図-3は $|E^*|$ と ω とのデータを両対数目盛でプロットしたものであり, ω が大きい程, そして T が低い程 $|E^*|$ が大きいことが判ると同時に, かなりの近似度で時間・温度重ね合わせの原理が適用できることを示している。

同図には 15°C に換算した $\log |E^*| \sim \log \omega$ のマスター・カーブもプロットしてあり, 横軸上の温度目盛は各温度に対応する移動量の対数即ち $\log a_T$ である。従って基準温度を 15°C 以外の温度にとりたい時には, 所要の温度の所へ縦軸 ($\omega = 100 \text{ rad/sec.}$) を平行移動するだけでマスター・カーブが直ちに得られる。

4. 定数係数の振動系との相違

F70の 15°C における $|E^*|$ および δ のマスター・カーブは図-4のようになる。この $|E^*|$ を半径, δ を角度として極座標表示したのが図-5である。 ω を増すにつれて $|E^*|$ と δ とで形成するベクトルは矢印のように動く。一般に粘弾性体を, Voigt 模型や Maxwell 模型で近似する方法があるが, 前者のベクトル軌跡は半直線に, 後者のそれは半円になるから, アスファルト混合物はこれらでは近似させ難いことがよくわかる。

Asphalt content	Code Letter	Asphalt (Pen. 80/100) PI=0.7	Code Letter	Asphalt (Pen. 20/40) PI=+5
Filter (CaCO ₃ powder) $\frac{V_{As}}{V_F}$	F	40, 50, 60, 70, 100 (%)	f	30, 40, 60 (%)
Sand (0.3 - 0.6 mm) $\frac{V_{As}}{V_S}$	S	10, 20, 30, 40, 60 (%)	s	10, 20, 40 (%)
Gravel (2.5 - 5 mm) $\frac{V_{As}}{V_G}$	G	11, 18, 25, 43 (%)	g	11, 18, 25, 43 (%)

表-1 供試体の種類とアスファルト量

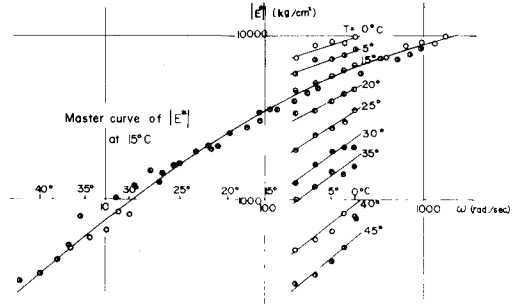


図-3 F70の各温度における $|E^*| \sim \omega$ および 15°C に換算した $|E^*|$ のマスター・カーブ

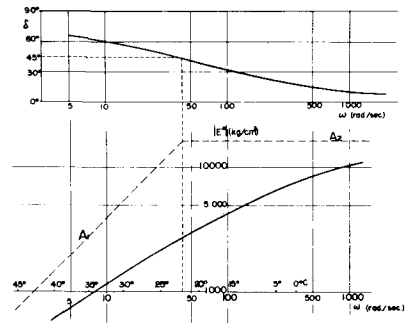


図-4 F70の $|E^*|$ および δ のマスター・カーブ (基準温度 15°C)

5. アスファルト混合物の粘弾性的特性

一般に、弾性体の場合には $\delta=0^\circ$ 、粘性体の場合には $\delta=90^\circ$ であることを念頭において図-4を見直せば、アスファルト混合物は ω を増加するにつれて粘性体から弾性体へと単調に変化して行くことがわかる。図中2本の漸近線 A_1, A_2 はそれぞれ $\omega \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$ ときのものである。即ち

$$\omega \rightarrow 0 \quad \delta \rightarrow 90^\circ$$

から、このときアスファルト混合物は粘性体と見なせるが、応力もひずみも正弦的に変化しているとすれば

$$\sigma(t) \approx \eta_0 \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \omega \eta_0 \varepsilon(t)$$

.....⑥

ここで η_0 ; $\omega \rightarrow 0$ のときの粘性係数 [$\text{kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$]

となり、④より

$$|E^*| \rightarrow \omega \eta_0$$

$$\therefore \log |E^*| \rightarrow \log \omega + \log \eta_0$$

.....⑦

従って両対数のグラフ上では傾き1の直線となる。また

$$\omega \rightarrow \infty \quad \delta \rightarrow 0^\circ$$

から、このときは弾性体と見なせるので $|E^*|$ は ω によらず一定になり、水平な直線 A_2 が得られる。

ここで興味深いのは、2本の漸近線 A_1, A_2 の交わるところの振動数で $\delta=45^\circ$ となることである。 $\delta=45^\circ$ というのは、弾性的な機構と粘性的な機構とが丁度同じ割合で作用しているところで、 $\delta > 45^\circ$ であればどちらかと言うと粘性的、 $\delta < 45^\circ$ であればどちらかと言うと弾性的と言える訳であるから、 $\delta=45^\circ$ というのは粘弾性体を理解する上の一つの大きな目安となりうると思われる。

また図-6からも判るように、二つ漸近線 A_1, A_2 が同じでも粘性体から弾性体への変化の仕方は種々あ

りうるので変化の仕方を表現するものとして A_1, A_2 の交点Pとその真下の $|E^*|$ の値Qとの距離(即ち $\log E_{\infty} / |E^*|_{\delta=45^\circ}$)に注目してみる。 PQ の長さが長ければ ω が増すときに粘性体から弾性体への変化が緩慢であり、短ければある ω の付近で急激に変化することを意味する。そしてP点は A_1, A_2 の交点であるから、 $\omega \rightarrow 0$ と $\omega \rightarrow \infty$ の究極的な状態を示す目安になるので、結局アスファルト混合物の粘弾性体としての特徴は、この PQ の位置と長さによってほぼ完全に表わることができると思われる。

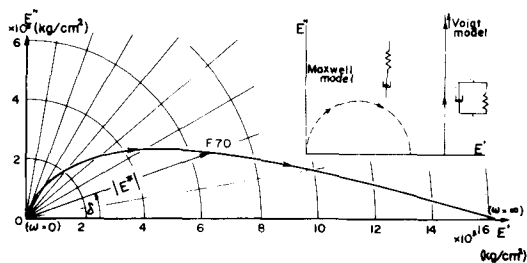


図5 F70の $E^*(i\omega)$ のベクトル軌跡(15°C基準)

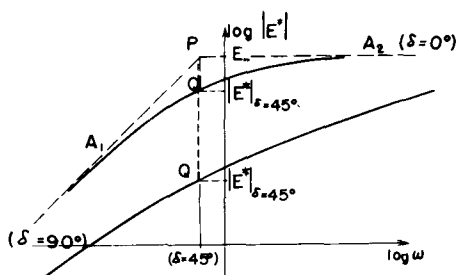


図-6 粘弾性的特性の判定尺度

6. 材料および配合の効果

図-7は、前述のPQの長さ 15°C における位置とを表-1の全供試体について示したものである。(a),(b)を比べて最も特徴的なのは、PQの横方向の位置がアスファルトの針入度によって大きく違っていることである。これは、アスファルト合材が粘性体から弾性体へ移り変わる振動数を支配するのは主にアスファルト自体の粘性係数だという事を示している。また、アスファルトのみのPQの位置はPen.20/40のものは(a)の右端であるが、Pen.80/100のものは(b)図に載らない程高振動数側である。これらと混合物の線分との位置の差が、フィラーや骨材を混入した効果となるが、フィラーや骨材を混入することによって粘性的な性質が低振動数でも現われ難くなるという効果がはっきりと読みとれる。図-7を今少し詳細に見れば、砂や碎石との混合物はどれも大体同じ位置と長さであるのに、フィラーとアスファルトとの混合物は位置も長さもこれらと非常に異なり、アスファルト量が増えるにつれて前者と性質が似てくることが判読できる。このことを解釈する試みとして、骨材表面に付着していると思われるアスファルト被膜の厚さを骨材の平均粒径を用いて計算してみると、約 $5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 以下の膜厚になると急に線分の長さが長くなることが判った。線分の長さは温度や振動数によらない固有のものであることや、静的な実験による結果からも同様の結論が得られたことなど(3)を考えると、なかなか暗示に富んでいると言えよう。

7. むすび

アスファルト混合物の力学的な性質に対する載荷時間や温度の影響、あるいは材料や配合の効果は前述の線分の位置と長さによって簡単に表現しうることがわかった。しかし、何如なる線分を持っていれば実際には望ましいのか、また望ましい線分を作るにはどうすれば良いかは今後の課題である。

最後に、本文は筆者らが、東京工業大学の学生であった飯塚隆久、中村正志、鈴木清高の諸氏と共に行った研究の一部であることを付記しておく。尚本研究は、文部省科学研究費の補助を受けたものである。

8. 引用文献

- (1) C.L.Monismith, R.L.Alexander, and K.E.Secore, "Rheologic Behavior of Asphalt Concrete," Proc. A.A.P.T. vol. 35, 1965
- (2) C.A.Pagen, "Rheological Response of Bituminous Concrete," H.R.B., 1965 (Highway Research Record, No. 67)
- (3) 渡辺阿部, 大町, 山縣, 五ノ瀬, "フィラーにおけるアスファルト薄膜の特異性" 第9回道路会議, 1969

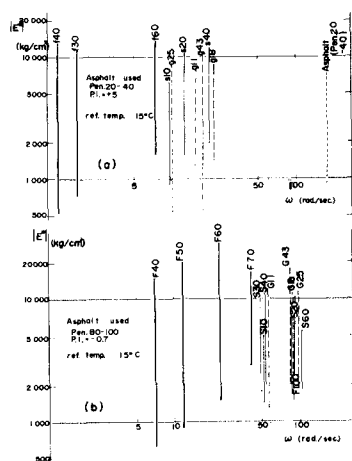


図-7 材料および配合の効果