

タール合材の動的応答

藤 居 宏 一^{*}

Koichi FUJII

Dynamic Response of Tar Mixture

非破壊試験の特徴はいうまでもなく測定対象を破損することなく材料試験ができるという点にある。この試験方法を適用すれば、そのままの状態で材料の諸性質、特に力学的性質・性状の把握が可能になる。したがってこの方法によって各種の材料の性質を明らかにし、構造物の設計上はもとより施工上の問題点を解明する資料を求めることができる。さらに現場試験にも応用できる利点を持っている。

それら構造物のうち道路、堤防の法面などにおいて今後ますます利用されると思われる瀝青材料を最初にとりあげ、タール合材を中心に若干の実験を試みた。

材料の動的応答を求め、その結果を解析して材料の諸性質を判定する方法はレオロジー測定法の一つとして近年よく行なわれている。これは材料に単位衝撃を与えたときその応答が減衰振動をなすと考え、その減衰波形を解析することによって材料の性質の指標化を試みるものである。

1. 基礎理論

一般に振動の方程式は次式で表わされる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -c \frac{dx}{dt} - kx + F(t) \quad (1.1)$$

m : 質量, c : 粘性摩擦係数

k : ばね定数, $F(t)$: 強制力。

ここでパラメーター

$$\frac{c}{m} = 2\varepsilon, \quad \frac{k}{m} = n^2, \quad \frac{F(t)}{m} = f(t)$$

ε : 粘性抵抗, n : 固有振動数
を用いて (1.1) を書きなおすと

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + n^2 x = f(t)$$

となる。

いまハンマーの衝撃 (単発) による起振であることを考慮すると, $f(t)$ は単位衝撃関数

$$f(t) = \delta(t) \quad \text{i.e. } \delta(t) = 0, \quad t \neq 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

で表わされると考えられる。

したがって単位衝撃によって起される振動の応答は, $t > 0$ で $f(t) = 0$ であることから自由振動と考え

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + n^2 x = 0 \quad (1.2)$$

なる線形微分方程式で表わされる。

初期条件

$$x|_{t=0} = 0$$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = \dot{x}_0$$

を考慮して (1.2) を解くと

$$x = \frac{\dot{x}_0}{\gamma} e^{-\varepsilon t} \sin \gamma t$$
$$\gamma = \sqrt{n^2 - \varepsilon^2}$$

なる解がえられる。 $n > \varepsilon > 0$ とすると (1.2) は線形減衰振動を表わす。

2. 材 料

実験ではタール合材をとりあげ弾性波試験を行なった。他の物理試験や力学的試験によって求められる結果と対比するため、合材の安定度試験 (Marshall 試験法) に用いるのと同種の供試体を利用した。

タール合材の配合は **Table 1** に示すようにタールの混合率を基準に設計した。

なお、供試体の寸法は $\phi 10.16 \times 5.08 \sim 10.16 \text{ cm}$ である。その数は各 4 ~ 14 個である。

これは今まで行なわれた静力学試験の結果より、ター

^{*} 農業施設工学研究室

ル合材の力学的性質に最も大きい影響を与えるのはタールの混合率であることによる。

Table 1 Percentage content of the mixture

Tar	Filler	Sand	Gravel	number
5	5	45	45	4
7	7	43	43	10
8	8	42	42	14
9	9	41	41	10
11	11	39	39	4

3. 実験方法

測定方法を図示すると **Fig 1** のように発振装置、変換器および受信装置からなる。

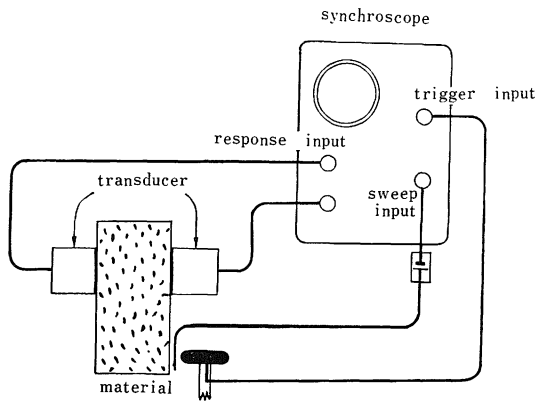


Fig. 1 Schematic diagram of the test

起振はハンマーによる軽い打撃によって材料に単位衝撃を与えることにした。

変換器は汎用性を考慮してチタン酸バリウムを使ったものを用いた。

受信装置としては、二現象の同時観測が可能で単掃引もできるシンクロスコープを使用した。

材料に衝撃を与えると同時に一定速度で単掃引させる入力（水平方向）が行なわれる。材料の応答は変換器を経て入力（垂直方向）が行なわれる。両者の合成によってブラウン管面にスポットの軌跡（波形）が現われる。それを写真記録するわけである。

瀝青材料は温度が変化すると性質が変わり、特に高温になると軟くなる性状を示す。それゆえ温度による影響を検討するため、材料に温度規制を行なって同種の実験を試みた。規制した温度は (A) 30°C, (B) 20°C, および (C) 10°C の 3 種で各 4 個について施した。

規制の方法は A については恒温乾燥炉を使用した。B, C については供試体を薄いポリエチレンで密封し各水槽（初めの水温 14°C）に入れた。B には温水を注ぎ攪

拌して 20~21°C に保ち、C には氷片を投入しつつ 7~9°C に保った。A, B, C いずれも約 3 時間の温度管理をした直後、材料を表面温度で点検しながら試験した。

4. 解析法

記録された応答は **Fig 2** のような減衰波形である。この波形を解析することによって、材料に関する種々の要素を見いだそうとするわけである。この要素の主なものとして減衰比、対数減衰率、減衰常数などがある。また方程式 (1. 2) の係数である粘性抵抗および固有振動数も重要な要素である。なお、前三者の用語・定義について一定していない面があるので、以下筆者の使用する定義を示す。

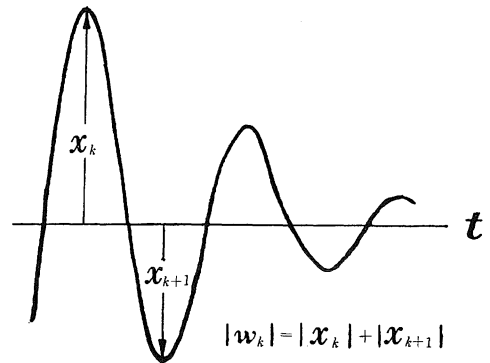


Fig. 2 Damping oscillogram

Fig 2 において、半周期（周期 T' ）ごとに現われる極大値・極小値の比

$$v = \frac{|x_k|}{|x_{k+1}|} = \frac{w_k}{w_{k+1}} = \exp\left[\varepsilon \frac{T'}{2}\right] = \exp\left[\pi \frac{\varepsilon}{\gamma}\right]$$

を減衰比とする。

この減衰比の対数

$$A = \log_{10} v = M\pi \frac{\varepsilon}{\gamma}$$

$$(M = \log_{10} e = 0.4343)$$

を対数減衰率とする。

一方

$$T' = \frac{2\tau}{r} = \frac{2\tau}{\sqrt{n^2 - \varepsilon^2}}$$

なる関係を用いて、 ε および n を T' と A で表わすと

$$\varepsilon = \frac{2}{M} \cdot \frac{A}{T'} = 4.605 \frac{A}{T'}$$

$$n = \frac{2\tau}{T'} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{M\pi}\right)^2} \tag{4.1}$$

$$= \frac{6.283}{T'} \sqrt{1 + 0.5372 A^2}$$

となる。

これら ε と n との比

$$h = \frac{\varepsilon}{n}$$

を減衰常数という。

解析するあたり、波形の周期と振幅を測ることによって T' および v (したがって A) を知ることができる。続いて (4.1) より T' と A から ε と n が算出できる。

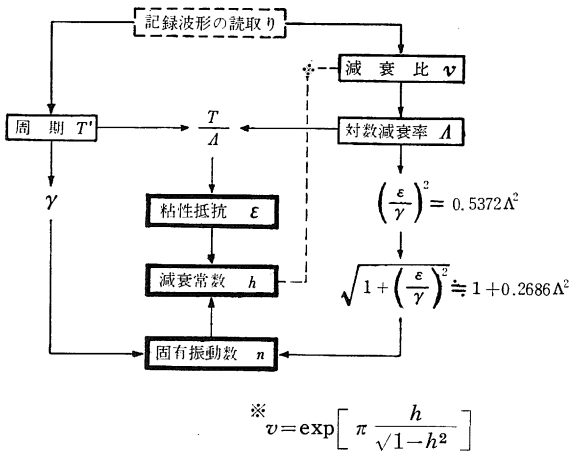


Fig. 3 Block diagram of interpretation of oscillogram

5. 結果・考察

材料の性質を代表する要素は前述のように、波形の解析から直接的に算定される減衰比 v と対数減衰率 A があり、方程式 (1.2) の係数である。また係数の比としての減衰常数 h および A と間に

$$v = \exp\left[\pi \frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\right]$$

$$A = M\pi \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} = 1.364 \frac{h}{\sqrt{1-h^2}}$$

なる関係が存在する。これらより材料の応答を h についてみれば v および A の様子も知ることができる、さらに n を知れば ε の値もわかることになる。

以下、資料を h について整理し、これを中心に考察

する。 h の分布は Fig 4 に示されている。

無次元数である h は図からもみられるとおりタールの混合率に依存している。混合率 7~8% のところで極小になっており、減衰性が最も弱いことを示している。従来の静力学試験でもタールの混合率 7~8% のところで弾性的性質が最も強く粘性的性質が最も弱いことが知られている。このように試験結果が同じ傾向を示すことから考えてもこの動的材料試験はかなり有用な方法と思われる。すなわち減衰常数 h が粘性的要素 ε と弾性的要素 n との比であることから、タール台材を粘弾体とみなす場合、この h がかなり重要な指標と考えられる。

参考までにタール混合率別の各 h について平均値 (および標準偏差) を計算してみると次のようになる

タール混合率	平均値 (標準偏差)
5%	0.120 (0.029)
7	0.090 (0.022)
8	0.078 (0.022)
9	0.100 (0.024)
11	0.104 (0.020)

固有振動数 n は周期に依存する要素である。したがって複雑な波形の解析に際してその解読が重要な問題となる。たとえば記録波形が何種類かの波の合成によっているものとすれば、いずれの波が材料固有の周期を表わすものかその判別が大切である。ノイズなどと考えられるものを除いてみると大略1500~1600%前後に分布している。

温度規制をした供試体の実験でも同様の傾向がみられた。材料の (表面) 温度 9~30°C について h, n の値を調べたが相関はみいだせなかった。この温度範囲では材料の性質について顕著な差異は存在しないように思われる。したがってこの種の実験はより高温 (50°C 以上) について行なってみることが望まれる。

今後、タールに限らず他の土木材料についてレオロジーの究明と材質の指標化を試みたいと考えている。

本実験は京都大学農学部農業工学教室の構造実験室で行なったものであり、同教室の沢田敏男先生、長谷川高士先生にご指導を賜った、ここに謝意を表します。

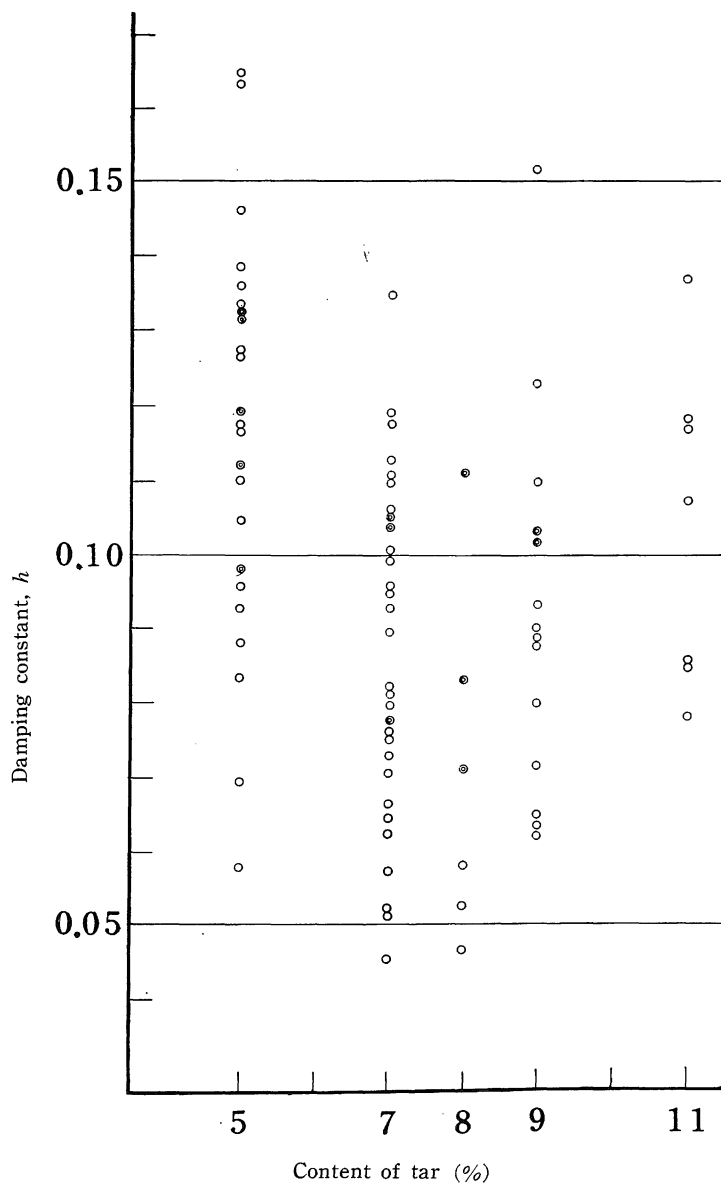


Fig. 4 Damping constant h for the tar content in the mixture

Summary

Non-destructive methods of testing structures have a good point which we may measure object as it is. We can understand mechanical properties of materials by the method. It is known as a general measurement method in rheology, which is the method to determine these properties by analysing the dynamic response of these oscillations.

On properties of materials, there are various problems in designing, constructing and others, so it is expected that they are made clear by applying method to materials.

The excitation to a testpiece is a unit impulse by knocking with the hammer. The response is received with the transducer, observed with the sychroscope and recorded with the camera.

The dynamic response is expressed in the equation of vibratory motion

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + n^2x = 0$$

where, ε : viscous resistanse, n : property frequency.

This motion is a damping oscillation, when $n > \varepsilon > 0$.

The interpretation is as follows.

1. The period T' and the (double) amplitude w_k are measured from the oscillogram.
2. The damping ratio v and the logarithmic decrement A are determined.
3. The coefficients of the eqaution, ε and n , are derived from these factors.
4. The damping constant h is indicated by ε and n , i. e. $h = \varepsilon/n$.

The coefficient n^2 depends on the dynamical elastic modulus and the index h is the factor concerning the ratio of viscosity to elasticity. The quality of the tar mixture depends on the ratio of the tar content in the mixture by weight.

To determine the mechanical properties of material, two factors are noticed. They are property frequency n and damping constant h . The relation between the constant h and percentage contents of tar in the mixture (by weight) is shown in Fig 4. This result agrees with those from other tests. The method of testing will be much useful and practical.