

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

笠原 篤**・菅原 照雄***

By Atsushi Kasahara and Teruo Sugawara

1. 概 説

アスファルト舗装において動的応答が特に問題とされる理由は、静的な荷重に対する応答と走行車両などによる動的な荷重に対する応答との間にかなり大きな差異が存在することにある。これはアスファルト混合物（以下単に混合物という）の荷重への応答が温度および時間の関数として示されることから当然である。混合物の力学的な性状および動的応答に関する研究はかなり古くから行われてきており、著者らも高速載荷時における混合物の応答についての材料学的な研究¹⁾、舗装の Rational Design におけるインプットとしての変形係数²⁾（スティフネス）などに関する研究を進めてきた。

本論文は、実際の道路舗装において生ずるであろう載荷時間、温度、ひずみ範囲内において、周波数 0.1~5 Hz（載荷時間に換算して 1.59~0.032 秒）、温度 -15~20°C、およびひずみ $2.5\sim 5.0\times 10^{-4}$ の領域における密粒度アスファルトコンクリートの動的応答に関する実験研究の成果を取りまとめたものであり、他の試験法で求めた複素弾性率およびクリープコンプライアンスなどを介し、ここで求められた動的応答の数値をチェックし、広領域でのレオロジー論の適用の可否についても論じた。

2. 本研究の意義および目的

実用への寄与を考えると、混合物の力学的な性状はかなり広範囲の温度および時間領域で把握されなければならない。また混合物の変形に関係した性状の把握は試

験法、温度領域、時間領域などにより、複素弾性率（スティフネス） $|E^*|$ ^{3),4)} または $S^5)$ 、緩和弾性率⁶⁾ $E_r(t)$ 、クリープコンプライアンス $J(t)$ ⁷⁾などを求めることによって行なわれるのが常である⁸⁾。これらの諸関数を概念的に、1本のマスターカーブで示したのが図-1である。

図-1に示した試験法は各関数の絶対値、すなわち温度、ひずみ速度、時間などの組合せによって選択されるものである。いうまでもなく各試験の境界は固定的なものではなく、かなりの幅で重複するものである。破線

で示したものは、かりに一定温度（または一定載荷時間）で考えた場合、載荷時間（または温度）として区分されるものである。

本研究の範囲における動的応答は、共振法⁹⁾、定ひずみ速度曲げ試験¹⁰⁾、応力緩和試験¹¹⁾、クリープ試験¹²⁾などによっては求めることが困難な領域（図-1ではBの領域）に属し、著者らは強制曲げ振動非共振法を用いることにより各種の実測を試みた。またこの領域における動的応答は、走行車両によって生ずる応力およびひずみ条件に近似させていることから、シミュレーション試験としての性格をもあわせ持ち舗装構造の力学解析ないし設計に密接に関連したものである。混合物の動的応答に関する研究は世界的にきわめて活発であり、1972年の Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements においても多数の論文が発表されている¹³⁾。しかし本研究のような比較的長い載荷時間の動的応答の研究例は、研究設備の困難性など

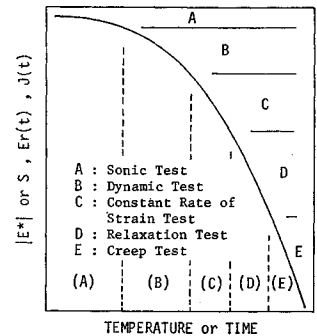


図-1 諸関数の概念図

* 土木学会第 26 回年次学術講演会 V-124, 土木学会第 27 回年次学術講演会 V-112 にて一部発表

** 学生会員 工修 北海道大学大学院工学研究科 博士課程

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木教室

からあまり見受けられない。なお動的応答についての既往の研究についてはすでに著者らが詳細に述べた^{14),15)}ので本論文においては省略することにした。

本研究において求めた力学的性状は、

- a) 複素弾性率 (E^*)
- b) 動的弾性率 (E')、損失弾性率 (E'')
- c) 損失正接 ($\tan \phi$)
- d) 複素のび粘性率 (η^*)
- e) 緩和弾性率 ($E_r(t)$)
- f) クリープコンプライアンス ($J(t)$)

などである。このうち複素弾性率、動的弾性率、緩和弾性率などは舗装構造を考えると、層の荷重分散効果を支配する一因子であり、一般的に変形係数と呼ぶことができる。損失弾性率、損失正接、複素のび粘性率、クリープコンプライアンス、動的弾性率などは舗装体の変形ならびにその復元を理論的に論ずる際必要な基礎的な性状となる。

以上の直接的な構造の力学解析への寄与のほか、ここにあげた諸項目は材料学的な性状評価の手段となりうる性格のものと考えられる。また混合物が繰返し载荷により疲労を生ずる過程において、混合物の力学的性状の変化は変形係数をもって論ずることができるとされていることから、本研究は、著者らが現在行っている疲労試験の一部をなすものでもある。

3. 舗装体に生ずる応力およびひずみ波形

舗装体のある1点を想定し、その点の真上を走行する車輪によって生ずる応力またはひずみは、弾性学的な層構造解析により近似的にある形状の波形をもって示すことができるということが多くの研究者¹⁶⁾によって明らかにされている。著者らは、各層の底面における応力およびひずみにシミュレートさせた波形を入力とし、その応答を得るのが最も適切であると考えた。しかしシミュレーションにあたって問題となるのは、応力とひずみどちらでシミュレーションするかである。粘弾性体の1種である混合物にとってみれば、それは非常に異なった意味を持っており、それらは端的に疲労性状¹⁷⁾に示されている。実際の道路条件にあてはめてみてもどちらが合致しているかは簡単に論じられず、むしろ場合に依りて両者の性状を把握する必要があると思われる。この意味から本研究に用いた装置(後述)は応力波形およびひず

み波形のいずれからシミュレーションが可能なののであるが、本論文においてはひずみ制御における研究成果のみを論じた。

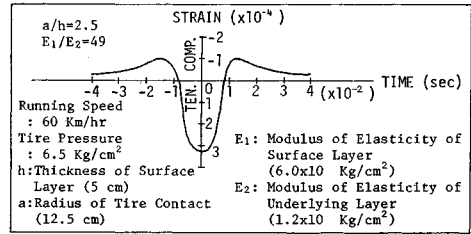


図-2 二層構造における第一層下面のひずみ

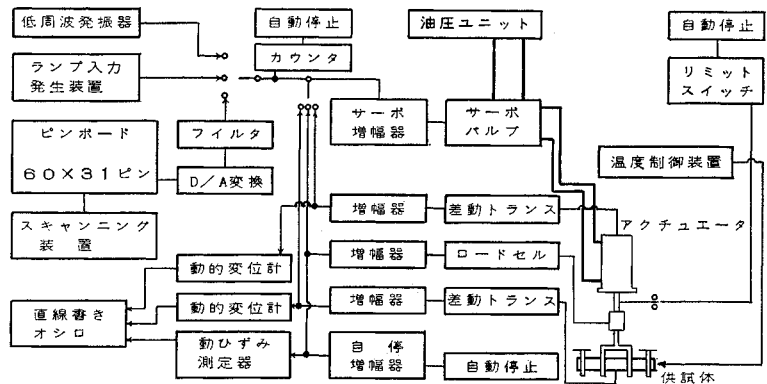


図-3 動的載荷装置の系統図

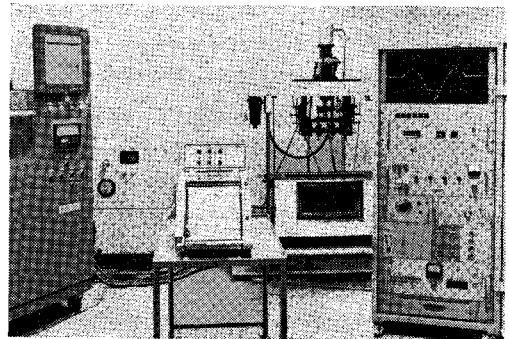


写真-1 動的載荷装置

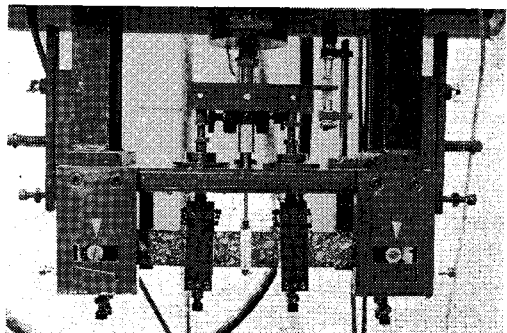


写真-2 載荷部

図-2 は図中に示された条件下でのひずみ波形を弾性理論¹⁸⁾に基づき試算した結果の一例である。実際には車輪の Tracking Force による水平方向の荷重に基づく水平ならびに垂直力をも考慮すると若干異なってくるであろうが、本研究ではこれらを一応無視した。

4. 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載荷および動的載荷(任意波形ならびに関数波形による)を行なうために著者らが製作したものである。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る。各部分の機能システムを系統図として図-3 に示し、装置全体を写真-1、載荷部を写真-2 に示す。

機能としては、

- a) 試験法：4 点載荷の両振りまたは片振り曲げ
- b) 供試体寸法：3×3×40 cm, 4×4×40 cm
- c) 制御方式：応力およびひずみの双方から制御
- d) 波形：正弦波, 三角波, 矩形波, のこぎり波, ピンボードによるプログラム波
- e) 最大許容荷重：±500 kg
- f) 動的な試験荷重：±120 kg
- g) 周波数：正弦波 0.1~20 Hz, 矩形波 0.1~2 Hz
(ただし、振幅 ±5 mm の場合、小振幅の場合は 100 Hz 位まで)
- h) 最大変位振幅：±5 mm

であり、なお各部の構造および機能の詳細については参考文献 15) に示したのでここでは省略する。

シミュレーション法としては、ダイオードマトリックス・ピンボードによる方法を採用した。この方式は変化に富んだ複雑な波形を表現しにくい欠点を持つが、走行荷重により舗装体に生ずる波形は図-2 に示したごとくさして複雑な形ではないことおよび速い応答を得られることから本研究に十分と考えた。さらに本装置は応力およびひずみ制御の両面から試験することが可能であり、荷重、シリンダ変位、供試体変位の個々のフィードバックが可能である。

試験装置の機構に電気・油圧サーボを用いることによりシミュレーション波を入力し、変形を生ぜしめる過程は実際条件において、「荷重が舗装構造に生ぜしめるひずみのうちある部分のひずみのみを取り出し、それを供試体に再現する」ものであり、一方変形の解放は「実際には舗装構造のレジリエンシーに基づくひずみの解放を機械で強制的に与えている」ものである。これは従来の方法においてはスプリング、板ばねなどで与えられていたひずみの複元をも実際条件にシミュレートさせるとい

う意味を持っている。

5. 試験材料および実験研究の方法

(1) 試験材料

試験材料は、針入度級 80/100 のストレートアスファルトを用いた密粒度アスファルトコンクリートであり、使用したアスファルトセメントの性状および材料の配合は付表として本論文の末尾に示した。

供試体は、材料を加熱混合(3 ポアズ温度)し、40×30×6 cm の型枠内でローラーコンパクタで転圧(30 ポアズ温度)し、かつホイールトラッキング試験機で温度 45°C において1時間トラバースを行ないニーディング作用を与えた試料を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で被覆した棒状供試体(3×3×35 cm)であり、それらを写真-3 に示す。



写真-3 供試体

(2) 試験法

著者らは先に混合物の破断ひずみについて4つのレベルを考える必要のあることを明らかにした¹⁹⁾。本研究においてはそのうち舗装体実際に生ずると考えられ、かつ疲労性状を論ずる場合必要とされるひずみ領域(10⁻⁴のオーダー)において実験を行なった。またひずみ 10⁻⁴のオーダーは過去の研究例に見れば、ほぼ完全に線形粘弾性領域と考えてもよい領域である。

供試体をスパン 30 cm, 載荷点間隔 10 cm になるようにセットし、温度制御された恒温水槽中において供試体にたわみを与えることにより正弦波およびシミュレーション波を入力とし、その応答として荷重を得る方法で実験を行なった。

(3) 解析法

一般に粘弾性体に振幅 σ_0 、周波数 f の正弦的に変化する応力を生ぜしめると、応力 σ は、 $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$ 、 $\omega = 2\pi f$ で表わすことができ、この応力を受ける物体

のひずみ ϵ も振幅 ϵ_0 , 周波数 f で ϕ だけ位相の遅れた正弦的变化を示し, $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$ で表わすことができる。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 (Complex Modulus) $E^* = E' + iE''$ を得ることができ, その大きさは $|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}$ となりスティフネスと同じものと考えることができる。応力とひずみの位相のずれより得られる位相角 (Phase Difference) ϕ は通常損失正接 (Loss Tangent) $\tan \phi = E''/E'$ で表わされ, その大きさは物体の粘性的要素の大きさを示している。なお E' は複素弾性率の実数部で動的弾性率 (Dynamic Modulus), E'' は虚数部で損失弾性率 (Loss Modulus) と呼ばれているものであり, その大きさは, $E' = |E^*| \cos \phi$, $E'' = |E^*| \sin \phi$ で示される。

複素粘性率は $\eta^* = \eta' - i\eta''$ で定義されるものであり, 複素粘性率と複素剛性率 (G^*) との間には次のような関係がある。

$$G' = \omega \eta', \quad G'' = \omega \eta''$$

ただし ω は角速度, $\omega = 2\pi f$

ここで, 動的剛性率 G' および損失剛性率 G'' のかわりに, E' および E'' を用いれば, 複素粘性は複素の粘性率となる。

本研究において, 応力およびひずみは変形量がきわめて小さいことから通常レオロジーの分野で解析される方法を取り²⁰⁾, すべて弾性解法によって計算を行なった。供試体の中央部での最大応力 (σ_{max}), 最大ひずみ (ϵ_{max}) は次式によって与えられる。

$$\sigma_{max} = \frac{6 P l_1}{b h^2}$$

$$\epsilon_{max} = \frac{12 h d}{3 l^2 - 4 l_1^2}$$

- ここで b : 供試体の幅 (cm)
- h : 供試体の高さ (cm)
- l : スパン (cm)
- l_1 : 支点から載荷点までの距離 (cm)
- P : 荷重 (kg)
- d : 供試体中央部のたわみ量 (cm)

6. 実験結果および考察

(1) 混合物の一般的な動的応答

温度 $-15 \sim 20^\circ\text{C}$, 周波数 $0.1 \sim 5 \text{ Hz}$ において, 密粒度アスファルトコンクリートに正弦的に変化するひずみ ($\pm 5.0 \times 10^{-4}$, たわみ量 0.21 mm) を入力とし, その応答として荷重および位相角を得た。これらから算出される $|E^*|$, E' , E'' , $\tan \phi$, $|\eta^*|$ などと載荷時間 ($1/\omega$, $\omega = 2\pi f$) の関係を 図-4 に示す。なお図中に示され

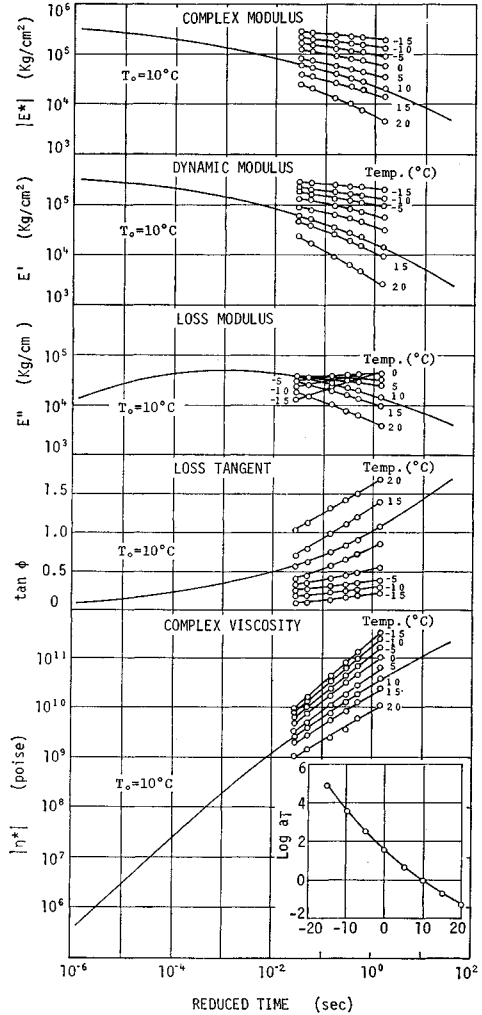


図-4 複素弾性率, 動的弾性率, 損失弾性率, 損失正接, 複素の粘性率と載荷時間の関係

ているマスターカーブおよびシフトファクターについては後に詳述する。

a) 複素弾性率 ($|E^*|$)

図は温度の低下に伴い $|E^*|$ の載荷時間依存性が小さくなり, -15°C における $|E^*|$ の値, $2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, は上限値に近いものであることを示している。

b) 動的弾性率 (E')

E' の温度および載荷時間依存性は $|E^*|$ のそれらに似ており, E' と $|E^*|$ の値は低温においてほぼ同一であるのに対し, 高温において E' はかなり小さくなることを示されている。これらは高温になればなるほど $|E^*|$ に対する E' の寄与が小さくなることを意味しているが, これは $E^* = E' + iE''$ で示されることから当然である。

c) 損失弾性率 (E'')

E'' の温度および載荷時間依存性は E' のそれとはか

なり異なった傾向を示している。低温(0°C以下)においては温度の低下および荷重時間の減少とともに E'' は減少する傾向を示すのに対し、高温(0°C以上)においては増大する傾向を示している。0°C近辺においては顕著な荷重時間依存性を示さない。 E'' はエネルギーの散逸を示すものであり、これは運動の量と時間がともに大きいときだけ大量のエネルギーを散逸するものである。それゆえ長時間および短時間領域においては0に近づき、中間の領域において E'' に極大が生じていることから、本実験において極大が生じたのも当然であるとしてよからう。本研究では E'' の最大値として約 4.5×10^4 kg/cm²が得られた。

d) 損失正接 (tan φ)

tan φ の値は温度の上昇および荷重時間の増大に伴い増加する傾向を示し、かつその荷重時間依存性は温度の上昇に伴い大きくなる傾向を示している。本研究の範囲において、tan φ の最大値として1.6なる値を得ることができた。

e) 複素のび粘性率 (η^*)

η^* の値は温度の低下および荷重時間の増大に伴い増加する傾向を示し、特に荷重時間依存性は $|E^*|$ などと比較してかなり顕著である。本研究の範囲において η^* の最大値として約 3.4×10^{11} poiseなる値を得た。

(2) 時間・温度換算法則の適用

熱レオロジー的に単純な物質に適用される時間・温度換算法則の密粒度アスファルトコンクリートへの適用について検討を試みた。

ここでは図-4に示された $|E^*|$, E' , E'' , tan φ, η^* と荷重時間の関係を示す各温度における曲線を用い、基準温度(T_0)を10°Cとして移程し、マスターカーブを得ることができた。このときの移程量(log aT)と温度との関係は1本のスムーズな曲線で表わすことができることなどから、密粒度アスファルトコンクリートに対する時間・温度換算法則は本実験の荷重時間領域、すなわち通常道路舗装において生ずるであろう荷重時間領域においても可能であると結論される。これは舗装体の応力、ひずみなどを考える場合きわめて重要な結論と思われる。

(3) 動的応答におけるひずみレベルの影響

実際道路舗装に生ずるひずみの大きさが混合物の動的応答にいかなる影響を与えるかについて、詳細に検討を試みた。

供試体中央部のひずみが 5.0×10^{-4} および 2.5×10^{-4} となるように2種のひずみレベルで正弦波を入力したときの応答として荷重および位相角を得た。この両者の応

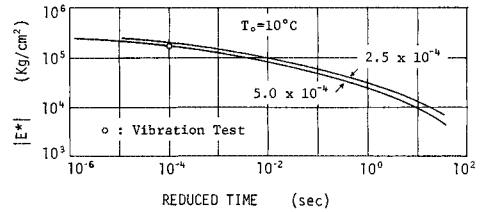


図-5 2種のひずみレベルによる複素弾性率のマスターカーブ
答はきわめて近似しており、図-5はその一例として $|E^*|$ のマスターカーブを示したものである。前者と後者の比は、荷重時間 1.0×10^{-4} 秒において0.88、 1.0×10^1 秒において0.7であった。なお図中に示されている共振法により得られた $|E^*|$ については後に詳述する。

図示されているように、ひずみ量により $|E^*|$ と荷重時間の関係を示す曲線において、絶対値の差は大きいとも受けとれるが、舗装体において応答として示される $|E^*|$ は 10^5 から数オーダー以下に分布していることなどから考えると、必ずしも大きな差とみなすことはできないであろう。

(4) 混合物の種類ならびにアスファルト量による動的応答の差異について

混合物の種類ならびにアスファルト量による動的応答の差異を検討するために、温度0°C、周波数0.1~5 Hzにおいて、密粒度アスファルトコンクリート(アスファルト量5.7%)、ロールアスファルト(7.2%)、アスファルトモルタル(7.5, 8.5, 9.5%)の3種の混合物(配合などについては付表に示す)に正弦的に変化するひずみ($\pm 5.0 \times 10^{-4}$)を入力し、その応答として応力および位相角を得るひずみ制御試験法を用いて実験を行なった。これらから算出される $|E^*|$, tan φと荷重時間の関係は図-6に示すようなものとなった。

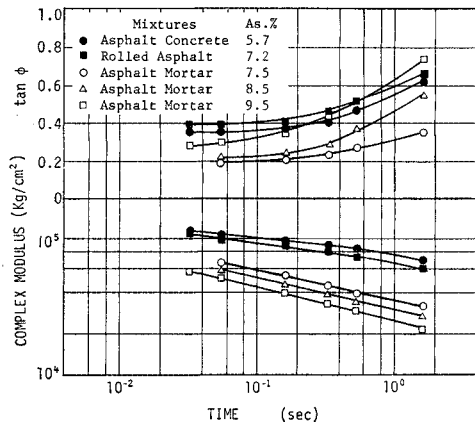


図-6 各種混合物の複素弾性率ならびに損失正接と荷重時間の関係

複素弾性率について、その大きさはアスファルトコンクリート、ロードアスファルト、アスファルトモルタルの順になるが、アスファルトコンクリートとロードアスファルトの差異は顕著でない。アスファルトモルタルにおいてアスファルト量が増加するにしたがい複素弾性率の大きさは規則正しく減少するように見える。

損失正接について、載荷時間の短い領域においてその大きさはロードアスファルト、アスファルトコンクリート、アスファルトモルタルの順になっている。ロードアスファルトとアスファルトコンクリートの差異は複素弾性率と同様に顕著ではなく、前者の値は後者よりわずかに大きい。アスファルトモルタルにおいてアスファルト量が増加するにしたがい損失正接の大きさは大となり、載荷時間の長い領域においてその差は大きくなる傾向にある。

以上混合物の種類ならびにアスファルト量の変化による動的応答の差異について論じたが、動的応答に影響を与えるであろう骨材の表面性状、アスファルト量、バインダーの性状など種々の因子についての解明には、なおきわめて大規模な実験が必要であり、これらについては機会をあらためて論じたい。

(5) シミュレーション波における動的応答

縦(振幅軸)31, 横(時間軸)60の計1860の穿孔された孔からなるピンボードにダイオードピンを打込むことにより、図-2に示されているひずみ波形をピンボード上に再現する(写真-1)。時間軸は60ピンを掃査する時間を0.1~99.9秒まで0.1秒単位で設定可能であることから、車両走行速度にほぼ完全に一致させることができる。また振幅軸は 0 ± 5 mmまでの変位($4 \times 4 \times 35$ cmの供試体において中央部の上・下縁ひずみに換算して $0 \sim 0.012$)を任意に与えることができることから、走行車両によって生ずる舗装体のひずみ波形を近似的に再現することができる。より正確なシミュレーションのためには、実測によって得られたひずみ波形をデータレコーダーから入力することも可能であるが、本研究では基本的な波形のみをとりあげた。図-7は一例として、ひずみ制御方式によるシミュレーション波形を示したものである。

本実験においてはシミュレーション波の最大引張りひずみの値を 3.44×10^{-4} に設定し、ひずみ制御試験におけるシミュレーション波の載荷時間の取扱いについて検討を試みた。

正弦波においては単位ラジアン当たりの時間($1/\omega$)を載荷時間としているが、シミュレーション波においては載荷時間を前者と同一レベルで換算することはできない。著者らは両者を同一レベルで論ずるために、図-8

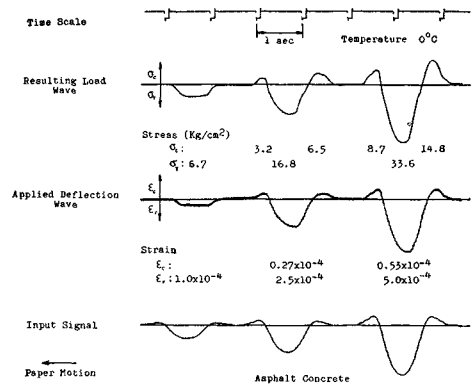


図-7 シミュレーション波形

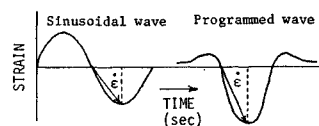


図-8 ひずみ速度

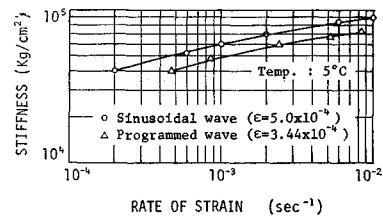


図-9 スティフネスとひずみ速度の関係

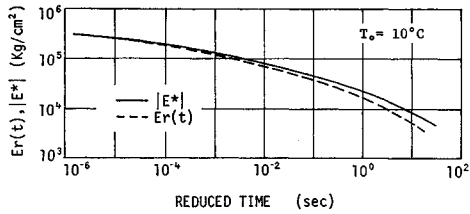
に示されるようなひずみ速度を定義した。

温度 5°C において、ひずみ量 5.0×10^{-4} の正弦波形、最大ひずみ量 3.44×10^{-4} のシミュレーション波形を入力としたときのスティフネスとひずみ速度(正弦波においては周波数を、シミュレーション波においては掃査時間を変化させた)との関係を図-9に示す。

スティフネスの値はシミュレーション波を入力としたときのほうが若干小さいようであるが、かなりの一致を示していると見てもよからう。この差異は、波形の相違、ひずみ速度が近似的なものであることなどに起因しているものと思われる。

(6) 緩和弾性率

材料学的に混合物の力学性状を把握する有効な手段として、層構造の荷重分散効果の支配因子として、また層構造の弾性理論解法のインプットデータなどとして、従来からスティフネス概念が重要視されてきているが、長時間領域における混合物の力学的な性状、温度応力などを論ずる場合変形係数として、スティフネスを用いるより緩和弾性率を用いたほうがより有効であると思われ



図—10 緩和弾性率ならびに複素弾性率のマスターカーブ

る²¹⁾。動的応答から緩和弾性率 ($E_r(t)$) を求めるために、図—4 における E' および E'' を用い $E_r(t)$ を算出した^{22), 23)}結果を 図—10 に示す。図には $|E^*|$ と $E_r(t)$ の差を明確にするために、 $|E^*|$ のマスターカーブをも示した。

図から明らかなように、 $T_0=10^\circ\text{C}$ において $E_r(t)$ と $|E^*|$ の値は、荷重時間 1.0×10^{-4} 以下においてよい一致を示しており、荷重時間が大きくなるに伴い両者の差は拡大する傾向が見られる。このことは、 $|E^*|$ は応力とひずみの比であり、 $E_r(t)$ は応力・ひずみ曲線の接線勾配であることから当然といえよう。

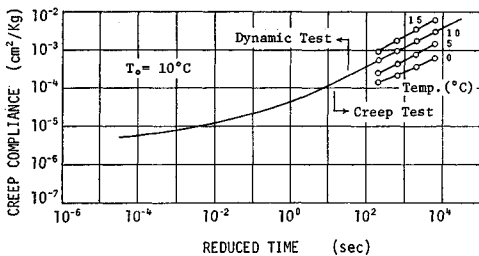
7. 動的試験と静的試験の関連性について

混合物の力学的な性状を把握するための試験法を大別すれば動的試験と静的試験になる。従来から混合物の動的性状と静的性状を結びつけることなく、個々に研究が進められてきた傾向が強い。ここでは、その関連性を粘弾性学的手法を用いて論ずることを試みた。

動的応答から算出されるクリープコンプライアンス ($J(t)$) と、実験手法が簡単でかつ理論的根拠が明確であり精度がよいとされる曲げクリープ試験から得られた $J(t)$ を比較することにより動的応答と静的応答の関連性を論じようとするものである。

本実験で得られた動的データから算出^{24), 25)}した $J(t)$ のマスターカーブと温度 0, 5, 10, 15°C における曲げクリープ試験から得られた $J(t)$ のマスターカーブを 図—11 に示す。

図から明らかなように、荷重方式がまったく異なる 2 方式、すなわち振動試験と静的試験の代表ともいべき



図—11 クリープコンプライアンスのマスターカーブ

クリープ試験から得られた $J(t)$ のマスターカーブは荷重時間 $1.5 \times 10^1 \sim 4 \times 10^1$ 秒の領域で完全なる一致を示した。

また一方、著者らは先に共振法により本研究で用いた密粒度アスファルトコンクリートとほぼ同一配合の混合物の $|E^*|$ を測定した²⁶⁾が、温度 10°C 、荷重時間 1.0×10^{-4} 秒におけるその値を本実験で得られた $|E^*|$ のマスターカーブ ($T_0=10^\circ\text{C}$) に重ねたものが 図—5 である。本実験で得られた $|E^*|$ ・時間曲線に時間・温度換算法則を適用することにより荷重時間領域を拡大したとき、荷重時間 1.0×10^{-4} 秒における $|E^*|$ の値と共振法により得られた値はきわめてよい一致を示した。

以上から、動的試験においては、共振法と強制振動非共振法より得られた $|E^*|$ は短時間領域で一致を示し、動的試験と静的試験の関係においては、両者から得られた $J(t)$ は長時間領域で一致を示したことから、本実験で得られた動的応答の結果は一応妥当なものと考えた。一方レオロジー論の適用により動的応答と静的応答をほぼ完全に結びつけることができ、共振法・強制振動非共振法・クリープ試験の 3 つの試験法で得られた力学特性値は概念的に 図—1 に示したような 1 本の曲線で表現することができると考えられよう。

8. 結 論

密粒度アスファルトコンクリートの粘弾性状を動的試験法を用いることにより、複素弾性率 (スティフネス)、動的弾性率、損失弾性率、損失正接、複素のび粘性率、緩和弾性率、クリープコンプライアンスなどとして求め実際の道路環境条件に相当する領域での性状を明らかにした。これらから得られた結論を要約すればおよそ次のとおりである。

(1) 実際の車両走行に対応させた荷重時間、温度、ひずみ領域において密粒度アスファルトコンクリートに時間・温度換算法則を適用することができ、それにより荷重時間約 7 オーダーの領域での動的応答を求めることができた。

(2) 実用上問題となるひずみレベル、すなわち 10^{-4} 以下のオーダーにおいて 2 種の正弦的に変化するひずみ波形を入力としたとき得られた応答はほぼ同一であると結論された。

(3) 舗装体に生じているひずみ波形をピンボードを用いることによりプログラム化し、シミュレーション波および正弦波を入力としたとき得られる応答は、ひずみ速度をパラメータとしてほぼ同一の考え方で論ぜられることを明らかにした。

(4) 混合物の複素弾性率と緩和弾性率の関係は、一

般の粘弾性体のそれと同様な関係を示し、温度 10°C において載荷時間が 1.0×10^{-4} 秒より短い領域において両者は完全に同じ値を示した。

(5) 本研究で求めた動的応答の値と、短時間領域において共振法で得た複素弾性率の値と、長時間領域において曲げクリープ試験で得たクリープコンプライアンスの値と比較した結果完全なる一致を示したことから、本実験で得られた動的応答の信頼性は広い載荷時間領域において高いと結論され、また動的試験と静的試験の双方から得られた応答は完全に結びつけられるものであることを明らかにした。このことは、混合物の力学的性状は広い時間領域においてレオロジー論の適用により把握されるということを示しているものであろう。

(6) 層構造の弾性解法に用うべき弾性率として広範囲にわたる複素弾性率、緩和弾性率を得た。すなわち舗装体の温度ならびに車両走行速度からする載荷時間（ひずみ速度）が試算上知られるならば、それに対応する混合物の複素弾性率、緩和弾性率は本研究で得られた図から求めることができる。なお図では煩雑さを避けるために 1 本のマスターカーブのみを示したが、基準温度 (T_0) を変えとことにより当然多くの温度、時間領域での値をうるることができる。

本研究は混合物の動的応答の原理的なもの、基礎的なものを論ずることに主眼をおいており、かつ研究の手法開発的な意味をもっている。動的応答に影響を与えると考えられる混合物の種類およびアスファルト量などのファクターについては、データが多量となることから、別な機会に論じたい。

おわりに本研究は北海道大学工学部交通材料学研究室において行なったものであり、舗装構造の力学的解析ならびにその計算については本学 芳村 仁教授のご指導をいただいた。また実験には土山和夫君の協力を得、さらに森吉昭博、上島 壯の諸氏にご討議をいただいた。ここ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実施したものである。

参 考 文 献

- 1) Sugawara, T.: Brittleness and visco-elasticity of bituminous mixtures, Annual Report of Roads, Japan Roads Association, pp. 61~66, 1970.
- 2) 阿部洋一・上島 壯・菅原照雄：短い載荷時間におけるアスファルト合材の粘弾性について，土木学会第 22 回年次学術講演会講演集，第四部，pp. 97-1~97-2, 1967.
- 3) 笠原 篤・上島 壯・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，No. 208, pp. 75~82, 1972-12.
- 4) Papazian, H.S.: The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on

- asphaltic concrete, Proc. 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 454~463, 1962.
- 5) van der Poel, C.: A general system describing the viscoelastic properties of bituminous and its relation to routine test data, Jour. Appl. Chem., Vol. 4, Part 5, pp. 221~236, 1954.
- 6) Monismith, C.L., R.L. Alexander and K.E. Secor: Rheological behavior of asphalt concrete, A.A.P.T. Vol. 35, pp. 400~450, 1966.
- 7) Pagen, C.A.: Rheological response of bituminous concrete, H.R.B., No. 67, pp. 1~26, 1965.
- 8) Highway Research Board: Factors involved in the design of asphaltic pavement surface, N.C.H.R.P. Report 39, pp. 9~14, 1967.
- 9) 前出 3) に同じ
- 10) 森吉昭博・上島 壯・菅原照雄：曲げ試験から求めたアスファルト合材の強さおよびスティフネスについて，土木学会第 23 回年次学術講演会講演集，第 IV 部，pp. 299~300, 1968.
- 11) 松浦精一・森吉昭博：アスファルト合材の応力緩和に関する研究，土木学会第 26 回年次学術講演会講演集，第 V 部，pp. 333~334, 1971.
- 12) 工藤忠夫・菅原照雄：水工用アスファルト混合物のクリープ挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第 201 号，pp. 113~122, 1972-5.
- 13) Pagen, C.L.: Dynamic structural properties of asphalt pavement mixtures, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 290~315, 1972.
その他数編
- 14) 菅原照雄・笠原 篤：アスファルト合材の動的応答と疲労について，道路建設，No. 295, pp. 43~53, 1972-8.
- 15) 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論文集，pp. 147~151, 昭和 47 年.
- 16) Jones, A.: Tables of stresses in three-layer elastic systems, H.R.B. Bull. 342, pp. 176-214, 1962.
その他多数
- 17) Highway Research Board: Factors involved in the design of asphaltic pavement surfaces, N.C.H.R.P. Report 39. pp. 67, 1967.
- 18) 前出 16) ならびに，鈴木征勝：道路舗装の層構造解析に関する研究，北海道大学修士論文，1969 年 3 月.
- 19) 笠原 篤・森吉昭博・石井哲夫・上島 壯・菅原照雄：アスファルト合材の破壊に関する研究，石油学会第 13 回研究発表会講演要旨，pp. 64~67, 1970.
- 20) A.S.T.M. Designation, D 790-66: Standard method of test for flexural properties of plastic, pp. 290~306, 1966.
- 21) Secor, K.E. and C.L. Monismith: Analysis and interrelation of stress-strain-time data for asphalt concrete, Transactions of the Society of Rheology VIII, pp. 19~32, 1964.
- 22) Ninomiya, K. and J.D. Ferry: Some approximate equations useful in the phenomenological treatment of linear viscoelastic data, Jour. Colloid Sci., Vol. 14, pp. 36~58, 1959
- 23) Ferry, J.D.: 高分子の粘弾性，東京化学同人，pp. 67~70, 1964.
- 24) 前出 22) に同じ.
- 25) 前出 23) に同じ.
- 26) 前出 3) に同じ.

付表 材料配合およびアスファルトセメントの性状

混合物の種類		密粒度アスファルト トコンクリート	アスファルトモルタル	ロールドアスファルト
骨材粒度 (通過重量百分率)	13 mm	100	—	100
	10	83.5	—	77.0
	7	74.0	—	56.9
	5	65.0	—	56.9
	2.5	47.7	100	56.9
	1.2	35.9	90	56.9
	0.6	25.0	80	56.9
	0.3	20.5	58.6	37.7
	0.15	14.5	14.9	20.2
	0.074	7.0	10.5	11.3
アスファルト量 (%)		5.7	7.5, 8.5, 9.5	7.2
摘 要		ストレートアスファルト 針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec) : 92 軟化点 $T_{R. \& B.}$: 46.3°C P.I. : -0.6		ストレートアスファルト 針入度 (25°C, 100 gr, 5 sec) : 69 軟化点 $T_{R. \& B.}$: 48.2°C P.I. : -1.0

(1972.12.14・受付)

水理公式集 昭和46年改訂版

みずのばいぶる ————— 土木学会水理公式集改訂委員会編
 ● B 5判・630ページ・8ポイント一段組・図版700個・上製箱入特製豪華本 ●
 定 価 4000円 会員特価 3600円 (〒250円)

《第1刷の正誤訂正表ができましたので、ハガキでお申出下さい》

昭和43年8月、水理公式集改訂委員会が組織されて以来3年有余を費やして完成した。改訂の基本方針は次のとおりである。

1. 従前の水理公式集についての基本的な考え方を尊重し、全面的な書替えは行なわず昭和38年増補改訂版を骨子として、その後の研究成果を取り入れ、最も新しい知見に基づく完璧な内容とし、より充実させたこと。

2. 従来の応用面からの編分けを、水理学・水文学に関する基本公式および基礎的事項を別編としてまとめた基礎編と従来の応用編の二つに大別し、利用の便をはかったこと。

3. 単なる公式の羅列にとどまらず、実際の適用にあたって十分指導性のある内容とするよう公式を慎重に吟味し、適確な解説を加えるとともに、図版の見易さを考え、従来のA5判をB5判に改めたこと。

総 目 次

●第1編 基礎編 1. 水理の基礎 2. 静水力学 3. 開水路水理の基礎 4. 管水路水理の基礎 5. 流水中におかれた物体の抵抗 6. 噴流・拡散 7. 波動 8. 密度流 9. 次元解析と相似律 10. 降水 11. 融雪・蒸発・蒸発散 12. 雨水の流出 13. 洪水流出(短期流出) 14. 長期流出(低水流出) 15. 土砂生産、流出 16. データ処理 17. 水文量のひん度

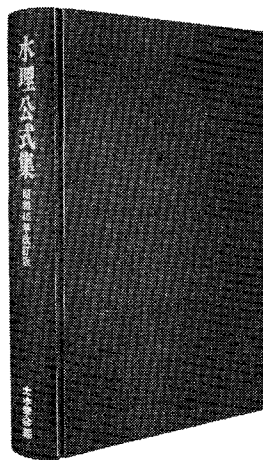
●第2編 河川編 1. 平均流速 2. 流速および流量測定 3. 不等流 4. 不定流 5. 流砂 6. 河床の変動と局所洗掘 7. 堤防およびアースダムの浸透

●第3編 発電編 1. 管路および開水路の流れ 2. せきと越流頂 3. ゲートおよびバルブ 4. 急勾配水路 5. 跳水と減勢 6. 水撃作用 7. サージタンク 8. 水力機械 9. 地震時動水圧 10. 温度密流

●第4編 上下水・水質保全編 1. 地下水 2. 管水路と開水路 3. 流量計およびポンプ 4. 浄水 5. 市街地雨水流出量 6. 下水処理 7. 汚泥 8. 水域の水質分布

●第5編 海岸・港湾編 1. 風波の発生・発達および伝播 2. 波の変形 3. 波圧および波の打ちあげ 4. 漂砂 5. 潮汐・潮流およびその他の流れ 6. 津波および高潮 7. 河口密度流および海岸の地下水

●人名索引・事項索引・数表・業界案内等



1 第1回トンネル工学シンポジウム

B5判・106ページ
定価 400円
会員特価 300円
(〒110)

トンネル用鋼アーチ支保工の設計施工について／長大トンネルの地質／トンネル工事における災害の実情について／高熱トンネルの施工について／名古屋市高速鉄道のシールド工法について／わが国トンネル施工のすう勢と問題点について

2 最近のトンネル工学 — 工事の実例と話題 — 〈第2回トンネル工学シンポジウム〉

B5判・136ページ
定価 500円
会員特価 400円
(〒110)

トンネル標準示方書制定について／青函トンネルについて／国鉄新丹那トンネルについて／羽田海底トンネルについて／富士川用水導水トンネル工事について／AN-FO爆剤とその発破法

5 第4回トンネル工学シンポジウム

B5判・268ページ
定価 1800円
会員特価 1600円
(〒170)

ソ連の地下鉄／アメリカのトンネル工事を視察して／アメリカにおける山岳トンネル工法／アメリカにおけるトンネル掘さく機／アメリカにおける都市トンネル／アメリカにおけるコンサルタント業務／アメリカにおける請負工事の諸事情について／アメリカのトンネル施工に関する新技術／欧州のトンネル工事を視察して／欧州におけるトンネル請負工事の諸事情について／欧州における山岳トンネル工法／欧州におけるトンネル掘進機について／欧州のシールド工事／欧州における地下鉄工事／欧州における沈埋工事

6 第5回トンネル工学シンポジウム

B5判・124ページ
定価 1000円
会員特価 900円
(〒140)

六甲トンネルの碎破帯突破について／トンネルの掘さくに伴う地表沈下測定例について／牧の原地すべり地区のトンネル施工について／紅葉山線・新登川トンネルの蛇紋岩区間の施工法と膨張土圧の測定結果について／京葉線・多摩川河底沈埋トンネルについて／大阪地下鉄の沈埋管工事—堂島川と道頓堀川の施工例について—／近鉄難波線の大型機械化シールドの施工例について

7 第6回トンネル工学シンポジウム

B5判・250ページ
定価 1800円
会員特価 1600円
(〒170)

I. 岩石トンネル掘進機の現状と将来(アメリカの場合、日本の場合)、II. 山岳トンネルにおける不良地盤掘削工法(イタリアの場合、アメリカの場合、日本の場合、日本の膨張性地山におけるトンネル施工法、トンネル土圧の時間依存性)、III. 市街地の軟弱地盤におけるトンネル工法(イギリスのシールド工法、日本の都市トンネルの現状、東京駅の大規模開削、ドイツの地下切抜げ、日本の地下切抜げ工法の問題点)、IV. 沈埋工法の現状と将来(オランダの場合、日本の場合)、など Tunnel Symposium '70と題して9月14～16日・東京文化会館で開かれたシンポジウム発表論文のすべてを収録す

土木学会沈埋トンネル小委員会編

沈埋トンネル要覧

B5判・188ページ
定価 2000円
(〒140)

土木学会トンネル工学委員会が土木研究所より受託した研究成果を委託先の許可を得て出版した要覧。総論、計画と調査、設計、施工の4編に分け、世界各国の調査例も参考に付す

OECDトンネル会議日本代表団編・学会監修

OECDトンネル会議の全貌と現場視察報告

B5判・406ページ
定価 12000円
(〒270)

昭和45年6月22～26日までワシントン市で開催されたOECDトンネル会議の全容を詳細に解説した有益なレポート。I. 概要、II. 会議の内容、III. 勧告書、IV. 会議についての各国の意見、V. 現地視察の5部作



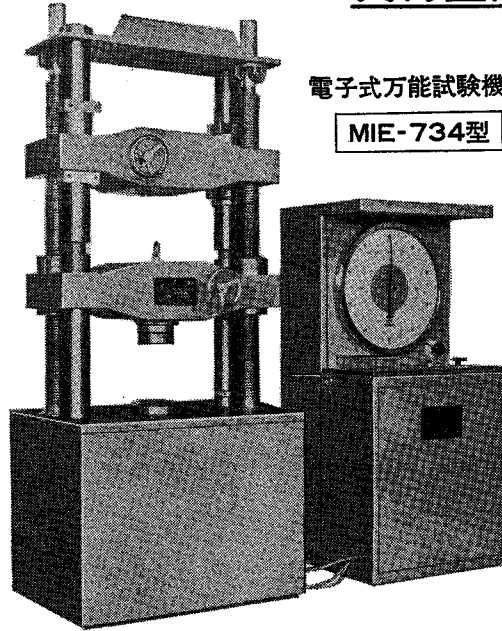
MARUI
創業50年

電気・油圧サーボシステム・自記計測のマルチ

1UP&UP

新しい万能材料試験機

電子式
実荷重計測式



電子式万能試験機

MIE-734型

計測機構と負荷機構の分離

直接計測して、従来の間接的計測の不可抗力的要素を省きました。

- ※ 負荷荷重の検出は特殊型ロードセル
- ※ 温度変化除く特殊電気回路
- ※ 特殊ロードセルは引張強度の1/2以下で使用
- ※ 荷重負荷は多連式ポンプにて行う
- ※ 計測指示は自動平衡装置利用

電子式?

特殊ロードセル方式のための
完全な電子式機構

特殊ロードセルは、D・T・Fを利用精度0.1μ
指針の動きはタコセネレーターによる自動平
衡方式。このように計測はすべて電子回路を
駆使しています

実荷重計測

多くの利点を
生みだします。

- ① 正確な計測
- ② 故障発生減少
- ③ 操作簡単
- ④ 感度上昇
- ⑤ 再現性いちじるしい
- ⑥ 負荷中レンジ切換えできる
- ⑦ 「0」調容易になった
- ⑧ 応答性早く0.05秒以内
- ⑨ 破断ショック影響受けない
- ⑩ 自記自動化が容易になった

油圧系統は負荷するだけ
計測値は関係ありません

※ 詳細ご二報下さい。
すぐ参上します。

—自記自動化のトップをめざす—

—信頼を旨とす—

株式会社 **丸井製作所**

営業品目

- | | |
|-----------|--------|
| 土質試験機 | 非破壊試験機 |
| アスファルト試験機 | 温調試験機 |
| コンクリート試験機 | 水理試験装置 |
| セメント試験機 | 材料試験機 |



MARUI

株式会社

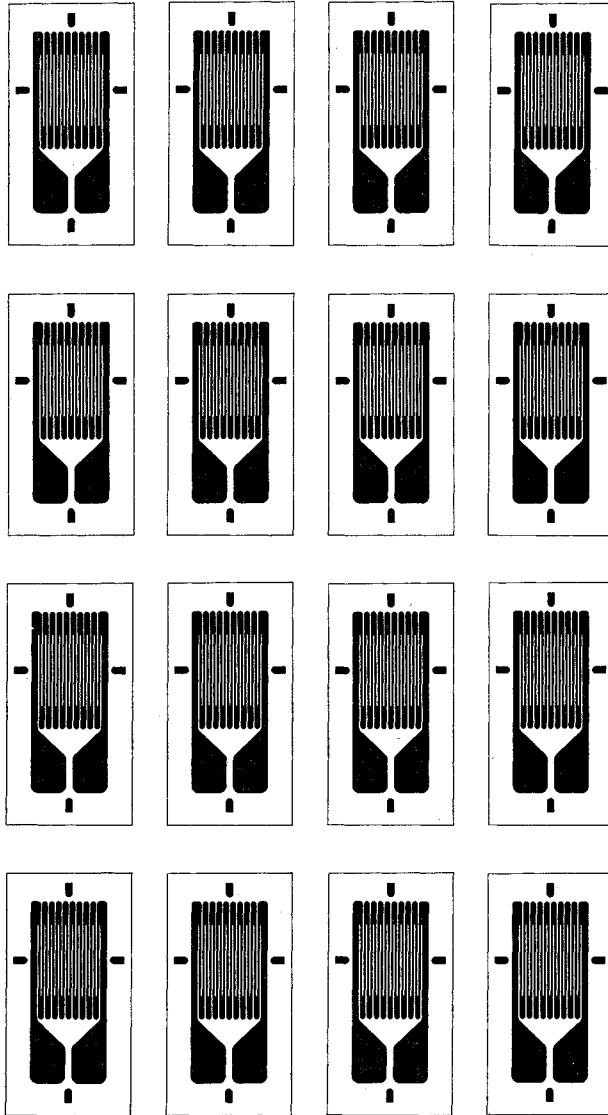
マルイ

東京営業所
〒 105
大阪営業所
〒 536
九州営業所
〒 812

東京都港区芝公園2-9-12
大阪市城東区蒲生町4-15
福岡市博多区比恵町1-6

TEL 東京 (03) 434-4717(代)
テレックス東京 242-2670
TEL 大阪 (06) 931-3541(代)
テレックス大阪 529-5771
TEL 福岡 (092) 41-0950

ひずみゲージは共和のフェステルゲージ



あらゆる種類の接着剤が使えます

箔フェステルゲージはベークライトベースのすぐれたクリープ特性、耐熱性、エポキシの耐湿性、ポリエステルへの貼りやすさをもったすぐれたゲージです。

接着剤はシアノアクリレート系、二液混合型ポリエステル系、エポキシ系、フェノール系熱硬化型どれも使えます。手なれた接着剤で貼りつけてお使い下さい。

一般ひずみ、応力測定から長期安定性の必要な変換器まで広くお使いいただけます。

特長

- あらゆる種類の接着剤が使える
- クリープが少ない
- 安価である
- ベースが小さい
- ベースが薄く使いやすい
- 180°Cまで使える
- カタログお送りいたします。誌名・製品名記入のうえ開発課まで

応力測定機器の専門メーカー

共和電業

本社・工場 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1
電話 東京調布0424-87-2111

東京事業所 03-502-3551
大阪営業所 06-942-2661
名古屋営業所 052-782-2521
福岡営業所 092-41-6744
広島営業所 0822-21-9536
札幌営業所 011-261-7629
水戸出張所 0292-25-1074