

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*

DYNAMIC PROPERTY OF BITUMINOUS MIXTURE AND ITS APPLICATION TO ANALYSIS OF PAVEMENT STRUCTURE

笠原 篤**・岡川 秀幸***・菅原 照雄****

By Atsushi KASAHARA, Hideyuki OKAGAWA and Teruo SUGAWARA

1. 概 説

アスファルト舗装の力学的な構造解析は弾性学の分野でまた材料学的研究は粘弾性の分野でめざましい進展をとげている。これらの研究を互いに関連づけることによりアスファルト舗装の合理的設計なる目的に一步近づけることができよう。しかし現在の段階においては、ごく一部を除いてそれらに関連づける研究はきわめて少ない。

アスファルト舗装構造の理論解析は、各層の変形係数、ポアソン比などの数値ならびに境界条件など多くの仮定に立脚していることから、実際の道路の環境条件下における舗装体のひずみおよび応力を正確に算出することは非常に困難である。それは層を構成している材料の力学的性状を十分には握ることが著しく困難なこと実際の環境条件を数量化することができていないことなどに起因している。土質材料から構成される路床、路盤に関しては、土質工学的なアプローチが必要であり、理論計算に必要な数値を得ることが重要であろう。この点に関し、CBRと変形係数との関係について多くの研究がある。そのうち Heuklom, W., Klomp, A.J.G. ら¹⁾が行った弾性波の伝播速度による研究は層としての変形係数という観点から注目されるものの1つである。これらに関連したものとしてダイナフレクト、ロードレイタ(いずれも米国における商品名)などを利用した舗装構造の評価に関する研究も活発に行われている。

アスファルト混合物をもって構成される層(以下これを単にアスファルト層とよぶ)については、その力学的性状は環境条件すなわち温度ならびに載荷時間に大き

く支配され、特にアスファルト層の変形係数は、それが粘弾性体であることから、温度と載荷時間の関数として示される。換言すれば理論計算に用いるべき変形係数は温度ならびに載荷時間を無視して決定することはできない。

舗装体の温度分布に関しても多くの研究があり、その分布は外気温、日射、風など多くの因子に影響されることが知られている。しかしアスファルト層の温度分布については、ごく狭い温度領域ごとにアスファルト層を分割し、各温度の n 層の積重ねからアスファルト層が構成されていると考えることにより取扱うことも可能となる。

一方舗装体における載荷時間に関しては、車両走行速度により一義的に決定されると考えられるが、層が荷重分散性能を具備していることから、層の深さによって載荷時間が異なる。すなわち深部ほど大となることは容易に推測される。この点に関し、理論計算、実測などにより、2,3の研究による研究があるが、アスファルト層の動的性状との関連性という観点からはいまだほとんど論議されるに至ってはいない。

以上の観点から、本研究においてはアスファルト混合物の動的性状を求め、層構造の弾性理論解法において重要な入力データである“層の変形係数”を合理的に決定するための“層における載荷時間の取扱い”について検討し、かつアスファルト混合物の疲労性状をも検討し、アスファルト混合物の動的性状と層構造理論との結びつきを検討した。なお舗装体の温度については、本研究においては代表的温度においてのみ論を進めているが、アスファルト混合物の弾性率に関してはマスターカーブ群を描くことにより他の多くの温度への適用を可能にしている。

道路舗装材料としてのアスファルト混合物の動的性状を求めるための手法としては、筆者らの既発表論文²⁾において述べたように粘弾性学の分野で広く利用されてい

* 土木学会第30回年次学術講演会 V-139にて一部発表

** 正会員 工博 北海道大学助手 工学部土木教室

*** 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部

**** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木教室

る強制振動非共振法、共振法などがあり、その振動は正弦波であることから、載荷時間は $1/\omega$ (ω :角速度) で定義される。しかしアスファルト混合物の動的性状を道路舗装構造に反映させる場合の問題点は走行車両による載荷時間が明らかでないことにある。筆者らが注目したのは走行車両によってアスファルト層下面に生ずる半径方向のひずみ分布であり、その波形は理論計算および実測などにより Bell Shape Wave であることが明らかになっている³⁾。本実験研究においては Bell Shape Wave を、ピンボードシステムを持つ動的載荷装置により、アスファルト混合物の供試体に生ぜしめ(以下この波形をプログラム波とよぶ)その応答を求める一方、正弦的に変化するひずみ波形を入力とする強制振動非共振法により動的応答を求め、その両者の波形による応答の差を明らかにし、弾性係数を同一にする載荷時間を求め、層構造における載荷時間を規定することを試みた。

またアスファルト混合物が繰り返し載荷を受ける場合、アスファルト混合物の動的性状は変化することは筆者らはすでに明らかにしている⁴⁾。すなわちアスファルト混合物の複素弾性率は繰り返し載荷回数が増大すると低下し、初期の値の 5~15% 程度低下すれば疲労破壊をおこしはじめる。換言するならば疲労破壊をおこしはじめるまでは、アスファルト混合物は初期の弾性率の 95~85% の値を維持しており、理論計算において用いるべき層の変形係数としていかなる値を採用するかは技術的判断となるが、アスファルト層が荷重分散性能を確保している期間が問題となる。このことから繰り返し載荷過程における弾性率の変化を論ずるためにも以下に述べる疲労性状をも検討した。

アスファルト混合物の疲労性状は、与えたひずみまたは応力の大きさと破壊回数との関係で論じられ、通常そのひずみまたは応力は正弦的に変化するものを用いている。しかし実際の道路舗装に生ずるひずみまたは応力は先に述べたように正弦的に変化するものではないことから、実際の道路舗装に生ずる波形によるアスファルト混合物の疲労性状を求めることが重要である。このことから本研究ではひずみ制御方式の繰り返し載荷試験において、正弦波およびプログラム波を入力としたとき、アスファルト混合物の疲労性状にいかなる差異があるかを検討した。

なお本稿では、“種々のかたちでの応力とひずみの比”として表わされるものを、正弦波で測定したとき複素弾性率 (Complex Modulus)、プログラム波で測定したときスティフネス (Stiffness) とよび、両者を一括して弾性率 (Stiffness Modulus) とよぶ。また層を構成した場合には、それを層の変形係数 (Stiffness of Asphalt

Layer) とよぶこととする。

2. アスファルト層に生ずるひずみ

アスファルト層、路盤、路床からなる 3 層構造について、層構造の弾性理論解法を適用し、アスファルト層下面に生ずる半径方向のひずみ (ϵ_r) を算出することを試みた。ここで用いた層構造の弾性理論解法は Burmister, D.M.⁵⁾ の理論を基礎として Schiffman, R.L.⁶⁾ が n 層構造の一般解を与えたものを、芳村ら⁷⁾ がハンケル変換などを用いて電子計算機に入力できるようにプログラム化したものを用いた。ここで計算を行うにあたっての仮定は以下の通りである。

- 載荷は等分布円荷重による。
- 各層は半径方向に半無限であり、均質弾性体である。
- 第 2 層 (路盤に相当) および第 3 層 (路床に相当) の弾性係数に関しては在来の研究の結果⁸⁾ から、本研究の範囲内では時間および温度依存性を無視して差し支えないことが明らかであることから、温度ならびに載荷時間依存性がないものとし、その大きさは $110 \times \text{CBR}$ ⁹⁾ で与えられるものとする。
- 各層のポアソン比はすべて 0.5 であるとする。
- 各層間は完全に粗 (せん断力を伝達する) であるとする。

また 3 層構造の弾性理論解法のインプットデータは

- a : タイヤの接地半径 (cm)
- P : タイヤの接地圧 (kg/cm^2)
- E_i : 各層の弾性係数 (kg/cm^2)
- H_i : 各層の厚さ (cm)
- ν_i : 各層のポアソン比

などである。なお本研究においては、アスファルト混合物の動的性状と舗装構造との関連を主眼としていることから計算の煩雑さをさけるため、変数を E_1 とし、他の変数は以下のように固定した。

- 輪荷重 5 t
 $a=17 \text{ cm}, P=5.51 \text{ kg}/\text{cm}^2$
- 各層の厚さ
 $H_1=20 \text{ cm}, H_2=60 \text{ cm}, H_3=\infty$
- 路盤、路床の CBR, 75 および 5
 $E_2=8250 \text{ kg}/\text{cm}^2, E_3=550 \text{ kg}/\text{cm}^2$
- 各層のポアソン比
 $\nu_1=0.5, \nu_2=0.5, \nu_3=0.5$

図-1 には、図中に示した 3 層構造において、 E_1 を $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ と変化させた場合の ϵ_r の分布を算出した結果を示した。

図より E_1 の低下にともないアスファルト層下面に生

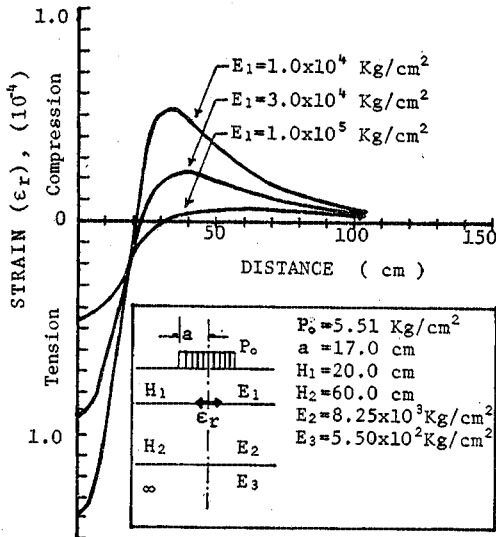


図-1 3層構造におけるアスファルト層下面の半徑方向ひずみの分布

ずるひずみ (ϵ_r) は増大し、 E_1 が $1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ から $1.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ に低下すると距離ゼロにおける ϵ_r は 4.5×10^{-5} から 1.4×10^{-4} と約3倍にも増大することを示している。このことを道路舗装に置き換えて考えると、 E_1 の低下は気温の上昇あるいは車両走行速度の低下としてとらえることができ、 E_1 が1オーダー小さくなるとひずみは約3倍にも増大することは、アスファルト混合物の温度依存性、疲労性状（後述）などを考えるとき、きわめて大きな意味をもつことになる。

3. 実験研究の方法および試料

(1) 実験研究の方法

a) 載荷装置

本研究に用いた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、静的ならびに動的載荷および繰り返し載荷試験を行うことのできる装置であり、これは油圧部、制御部、載荷部、記録部、温度制御部から構成されている。各部の機能については、その詳細を既発表論文¹⁰⁾に示しているので、ここでは任意波形（プログラム波）の発生機構に関連したもののみを述べる。

本装置の任意波発生機構はダイオードマトリックス方式であり、時間軸 60 穴、電圧軸 16 穴の計 1860 穴をもつピンボード（写真-1）にダイオードピンを差込み、フィルタを通すことによりかなりスムーズな形をした任意波形を得ることができる。60 穴の時間軸を掃査する時間を 0.1~99.9 秒の範囲内で 0.1 秒単位で設定することができる。また本ピンボードシステムはインターバ

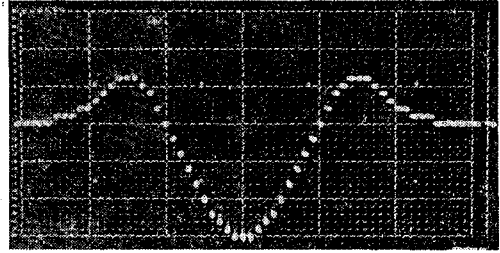


写真-1 ピンボード

ル軸（電圧軸 16 穴）をも併せもち、任意のレベルの電圧をインターバル時間設定機構により 1~99 秒の範囲内で 1 秒単位で設定することができる。

b) 試験法

実験は動的載荷試験ならびに繰り返し載荷試験とも正弦波およびプログラム波を入力とするひずみ制御方式で行い、与えるひずみ量は線型粘弾性領域と考えてもよい 10^{-4} のオーダー、これは舗装体のアスファルト層下面に実際に生ずるひずみ領域の上限近辺でもある値を用いた。

合成ゴムで被覆された供試体をスパン 30 cm、載荷点間隔 10 cm にセットし、温度管理された恒温水槽中において動的載荷試験ならびに繰り返し載荷試験を行った。試験条件などは一括し表-1 に示されている。

表-1 試験条件

	Strain	Temperature (°C)	Sweep Time (sec)	Frequency (Hz)
Dynamic Test				
Programmed wave	2.0×10^{-4}	-15~20	0.2~50.0	—
Sinusoidal wave	2.0×10^{-4}	-15~20	—	0.1~10.0
Fatigue Test				
Programmed wave	$(6.5 \sim 11.0) \times 10^{-4}$	-10~10	0.1	—
Sinusoidal wave	$(5.5 \sim 10.0) \times 10^{-4}$	-10~10	—	10.0

(2) 試料

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た。なお粒度組成ならびにバインダー性状は表-2 に

表-2 粒度組成およびバインダー性状

Sieve Opening (mm)	% Passing	Binder
13.0	100.0	Straight Asphalt 80/100 PEN. (25°C, 100 g, 5 sec) : 83 TR&B (°C) : 48.0 P.I. : -0.4
10.0	93.0	
7.0	77.0	
5.0	70.0	
2.5	50.0	
1.2	40.0	
0.6	30.0	
0.3	19.9	
0.15	9.1	
0.074	5.6	

示した通りであり、混合物中のバインダー量は 5.55% である。

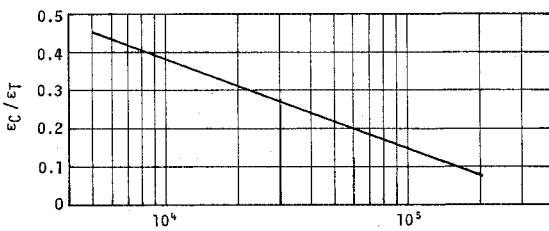
各材料を 2 ポアズ温度 (149°C) で加熱混合し、40×30×6 cm の鋼製型枠内で 30 ポアズ温度 (102°C) にてローラコンパクトで転圧し、かつホイールトラッキング試験機を用い、45°C において約 1 時間トラバースをかけ、ニーディング作用を与えた試料ブロックを作製する。

供試体はブロックからダイヤモンドカッタにより 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供試体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。

4. 動的性状

(1) プログラム波による動的性状

図一1 に示したようにアスファルト層の変形係数が変化すればアスファルト層下面に生ずる半径方向のひずみ (ϵ_r) の分布は異なり、特に圧縮ひずみの最大値 (ϵ_c) と引張りひずみの最大値 (ϵ_T) の比は 図一2 に示すように異なる。Bell Shape Wave を実験的にピンボードによりプログラム波化するとき問題となるのは 図一1 に示したような Bell Shape Wave のどの波形を採用するかである。 ϵ_c/ϵ_T が 0.133, 0.267, 0.800 である各波形について、温度 0°C および 10°C において掃査時間



STIFFNESS OF ASPHALT LAYER, E_1 (Kg/cm²)

図一2 アスファルト層の変形係数とひずみ波形における圧縮ひずみの最大値 (ϵ_c) と引張りひずみの最大値 (ϵ_T) の比との関係

表一3 プログラム波の波形によるスティフネスの値 ($\times 10^4$ kg/cm²)

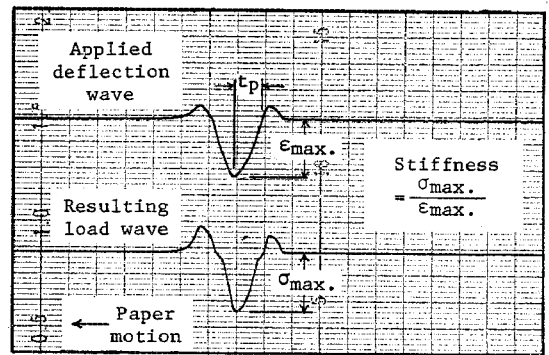
Temperature	0°C			10°C			
	ϵ_c/ϵ_T	0.133	0.267	0.800	0.133	0.267	0.800
Time							
3.2×10^{-2}		3.8	4.3	4.3	3.4	3.6	4.0
8.5×10^{-2}		3.7	4.1	4.0	3.0	3.0	3.6
1.7×10^{-1}		3.5	4.0	3.8	2.7	2.8	2.9
3.4×10^{-1}		3.2	3.9	3.7	2.4	2.5	2.6
8.5×10^{-1}		3.0	3.6	3.5	2.0	2.0	2.0
1.7×10^0		2.6	3.4	3.0	1.6	1.6	1.6
3.4×10^0		2.4	3.1	2.7	1.3	1.3	1.3
8.5×10^0		2.1	2.8	2.4	0.96	0.96	0.96

を変化させスティフネス (後述) を測定した結果を 表一3 に示した。

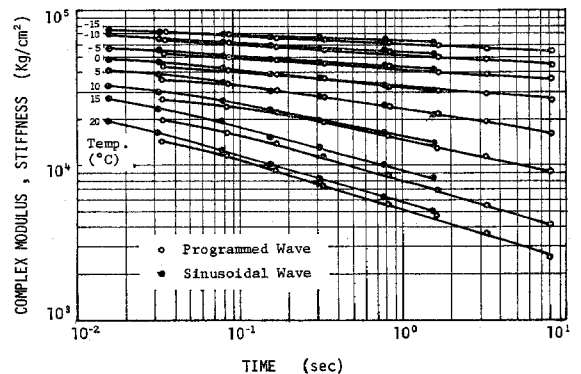
波形によりスティフネスの値は若干異なるようであるが明確にできるほどの差ならびに傾向を見い出せないことから、ここに示すような Bell Shape Wave におけるスティフネスは大きな変動を示さないと判断し、 $\epsilon_c/\epsilon_T = 0.267$ すなわち $E_1 = 3.0 \times 10^4$ kg/cm² におけるひずみ波形をもって Bell Shape Wave を代表させ実験を進めた。

$\epsilon_c/\epsilon_T = 0.267$ となるよう、またスムーズカーブとなるようにピンボードにピンを打込むことによりプログラム波 (写真一1) を得る。温度 -15~20°C において時間軸 60 穴を掃査する時間を 0.2~50 秒と変化させ、供試体中央部の下縁の引張りひずみの最大値 (ϵ_T に相当するひずみ) が 2.0×10^{-4} となるように制御し、プログラム波を供試体に入力し、その応答として示される応力波形 (図一3) を得る。プログラム波によるスティフネスを 図一3 に示したように最大応力 (σ_{max}) と最大ひずみ (ϵ_{max}) の比として定義し、載荷時間としてここでは一応かりに 図一3 に示されている時間 (t_{pk}) を採用した。

図一4 は各温度におけるスティフネス・載荷時間曲線



図一3 プログラム波を入力したときの動的応答



図一4 弾性率と載荷時間との関係

を両対数紙上に示したものであり、これらは同一試験条件において6本の供試体についての実験結果の平均値を示したものである。なお各温度ならびに掃査時間におけるスティフネスの変動係数は0.07~0.16の範囲にあり、温度ならびに掃査時間の変化に対する変動係数の変化の傾向は見られず、変動係数の平均値は0.10を示し、この種の材料の試験結果としては比較的良好なものと考えてもよいであろう。

図に示した測定時間領域は舗装における表層の載荷時間に換算(後に詳述)すれば、およそ時速35 km から0.1 km の範囲にあり、この範囲内においてアスファルト混合物のスティフネスは温度の上昇および載荷時間が長くなるにともない減少することがわかる。

(2) 正弦波による動的性状

温度 -15~20°C において、周波数 (f) を 0.1~10 Hz と変化させ、供試体中央部の上、下縁のひずみの最大値が 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および位相角を得る方法(強制振動非共振法)で実験を行った。解析法などの詳細は筆者らの既発表論文¹⁰⁾に示されているのでここでは省略する。

応力の振幅とひずみの振幅の比として示される複素弾性率 ($|E^*|$) と載荷時間 ($1/\omega$, $\omega=2\pi f$) の関係を図-4 にプログラム波によるものと同時に示した。これらも同一試験条件において6本の供試体についての実験結果の平均値を示したものであり、各温度および周波数における複素弾性率の変動係数は0.06~0.15の範囲にあり、その平均値は0.09であり、プログラム波による場合と大差はない。前項と同じくこの実験領域は時速に換算して70 km から0.7 km 程度である。なおこれらについてはさらに詳細に後述する。

5. 疲労性状

アスファルト混合物の疲労性状に関する研究の目的の多くは正弦的に変化する応力またはひずみ波形を供試体に与え、与えた応力またはひずみの大きさと破壊に至るまでの繰り返し載荷回数(以下単に破壊回数とよぶ)との関係を求めることにあり、多くの研究者によりかなりの成果を得ている。しかし前述したように車両走行にともないアスファルト層に生ずるに生ずるひずみ波形は正弦波ではないことから、Bell Shape Wave による疲労抵抗性を明らかにし、正弦波による場合との関連性を検討することは実際のアスファルト舗装の寿命予測の観点からも重要なこととなろう。この点に関する最近の研究では van Dijk, W. らの研究¹¹⁾があり、各種の手法を

用いてアスファルトならびにアスファルト混合物の疲労性状を求めており、その中で応力制御方式により Bell Shape Wave を供試体に与え実験を行い、休止時間(車頭間隔, 車輪間隔に対応すると考えられる)によるアスファルト混合物の疲労回復に注目し、正弦波による場合と比較し考察している。

筆者らは先に求めたプログラム波ならびに正弦波によるひずみ制御方式の繰り返し載荷試験を行い、単位時間当りの載荷回数が同一(1秒間に10回)のとき、波形の差異が繰り返し載荷過程における動的性状の変化⁴⁾ならびに破壊回数に及ぼす影響を与えるかを、ここで論じようとするものである。

温度 -10, 0, 10°C において、プログラム波では60ピンを掃査する時間を0.1秒として最大引張りひずみを $(6.5 \sim 11.0) \times 10^{-4}$ と変化させ、正弦波では周波数を10 Hz としひずみ振幅を $(5.5 \sim 10.0) \times 10^{-4}$ と変化させ実験を行った。

(1) 動的性状の変化

筆者らは先に繰り返し載荷によるアスファルト混合物の力学的性状の変化を複素弾性率の低下率としてとらえることができることを指摘し、かつそれと破壊回数とは密接な関係があることも明らかにした⁴⁾。

ここでは、繰り返し載荷過程における弾性率の変化をプログラム波の場合にはスティフネスの低下率として、また正弦波の場合には複素弾性率の低下率としてとらえ、波形がこれら低下率に及ぼす影響を与えるかを検討した。

図-5 は与えるひずみを変化させた場合の両波形による低下率を示したものである。ある程度のばらつきを示しながらも、ひずみと低下率との関係は両対数紙上でほぼ直線であり、同一ひずみを想定した場合各温度におい

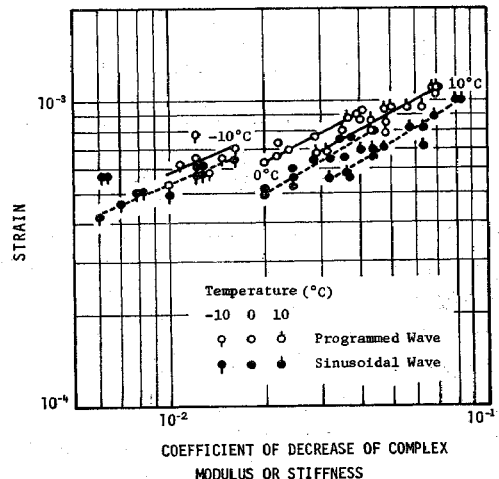


図-5 ひずみと弾性率の低下率との関係

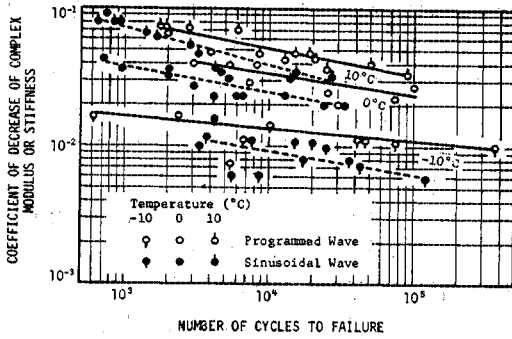


図-6 弾性率の低下率と破壊回数との関係

て正弦波に比しプログラム波で載荷したとき低下率は小であることが明らかになった。

与えるひずみを変化させたときの低下率と破壊回数との関係は 図-6 に示すように 両対数紙でほぼ直線であり、各温度において低下率の減少とともに破壊回数は大となる傾向を示している。同一の低下率を想定した場合、各温度において正弦波に比しプログラム波で載荷したとき破壊回数は大となることが明らかになった。

(2) 破壊回数

与えたひずみ量を ϵ 、破壊回数を N とするとき、両者の関係は両対数紙上で直線として示されることはすでに多くの研究者によって示されており、両者の関係を示す実験式は以下のように示されることが多い。

$$N = K \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^a$$

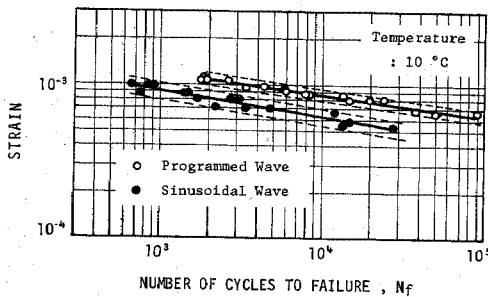


図-7 プログラム波および正弦波におけるひずみと破壊回数との関係 (10°C)

図-7 は例としてプログラム波および正弦波による温度 10°C における $\epsilon-N$ 関係を示したものである。プログラム波および正弦波による $\epsilon-N$ 関係は、両波形ともある幅をもった帯で示される。

また両波形による $\epsilon-N$ 関係は波形により異なった所に位置しており、図は同一ひずみを想定した場合、破壊回数はプログラム波の場合大となることを示している。

各温度、各波形における $\epsilon-N$ 関係に前記した実験式を適用し、最小 2 乗法によりその係数を算出し、 $\epsilon-N$ 関

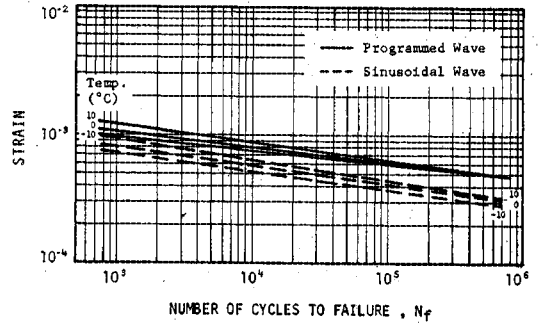


図-8 プログラム波および正弦波における $\epsilon-N$ 関係

表-4 実験式の係数

		Temperature (°C)		
		10	0	-10
Sinusoidal Wave	K	6.28×10^{-17}	1.03×10^{-19}	5.37×10^{-24}
	α	6.329	7.092	9.009
Programmed Wave	K	2.07×10^{-18}	2.40×10^{-21}	2.54×10^{-28}
	α	7.092	7.937	10.092

$$N_f = K \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^a$$

係を求め 図-8 に示した。なお 表-4 には実験式の係数を一括して示している。

各温度において正弦波による $\epsilon-N$ 直線の傾きよりプログラム波によるその傾きの方が緩やかであり、両波形において温度の低下とともに直線の傾きは緩やかとなることも明らかになった。

表-5 プログラム波による破壊回数 (N_{fp}) と正弦波による破壊回数 (N_{fs}) との比

Strain	Temperature (°C)		
	-10	0	10
10×10^{-4}	6.6	7.3	5.9
9×10^{-4}	8.0	8.1	6.1
8×10^{-4}	10.4	9.5	6.7
7×10^{-4}	13.5	10.8	7.7
6×10^{-4}	18.9	13.2	9.7
5×10^{-4}	24.6	14.1	9.6

同一ひずみを与えた場合、プログラム波および正弦波による破壊回数にかなりの差異があるかを明らかにするために、各温度においてひずみごとに両波形による破壊回数の比 (N_{fp}/N_{fs}) を表-5 に示した。

表より与えるひずみが小さくなれば破壊回数の比は大となる傾向を示し、その値は 24.6 にもなり、また温度が低いほどその傾向も大となることが明らかにされた。

単位時間当りの載荷回数 (10 回/秒) ならびに最大引張りひずみを同一とした繰り返し載荷試験において、正弦波に比しプログラム波を入力したとき、アスファルト混合物の破壊回数が大となる現象はおおよそ以下の理由によるものと推測されよう。

a) 混合物に生ずる応力の大きさ

前章の動的性状において述べたように、10 Hz の

正弦波、掃査時間 0.1 秒のプログラム波を入力としたときスティフネスの大きさは異なることから、混合物に生ずる応力の大きさはプログラム波の方が小さくなること。

b) ひび割れ発生の確率

正弦波を入力としたとき供試体に生ずるひずみは、上縁および下縁において同じ大きさであることから、ひび割れは上縁または下縁のどちらかから入るが、プログラム波の場合は下縁からしか入らないこと。

c) 休止時間の影響

正弦波においては休止時間はゼロであるが、本研究において用いたプログラム波には載荷 1 回当たり約 0.018 秒の休止時間があり、この時間内に繰り返し載荷によるダメージが回復すること。

6. 動的性状の層構造問題への利用

本章においては先に求めたアスファルト混合物の動的性状の工学的な利用を目的とし、室内実験で得られたアスファルト混合物の動的性状をアスファルト舗装構造における“層としての性状”としてとらえ、層構造の弾性理論解法に適用することを試みた。

アスファルト混合物は周知のごとく粘弾性体であることから、理論計算において弾性理論を適用することには若干の疑問が生ずるが、第 3 回アスファルト舗装構造設計に関する国際会議においても弾性理論も有力な 1 つの手段であると評価されている¹²⁾。すなわち温度、走行速度などの環境条件を幅の狭い領域においてでも定量化することができるなら、その条件下において弾性理論を適用することには問題はないと考えられる。理論計算においては前述したように種々の仮定に基づいて計算が行われているのが現状であるが、一方環境条件の変化に対応させ、種々の因子を定量的に把握する努力が多くの研究者により進められている。

路盤、路床などに関する考察は本論文の主旨からはずれることから、別の機会に譲ることにし、ここでは弾性理論解法において非常に重要な因子の 1 つであるアスファルト層の変形係数についてのみ考察を進めることにする。

前述したようにアスファルト混合物の弾性率は温度ならびに載荷時間の関数として示されることから、車両走行時におけるアスファルト層の変形係数はその条件下における温度ならびに載荷時間を求めることができれば決定することができ、温度に関しては近似的に前述した温度の異なる（すなわち変形係数の異なる）層の積重ねという考え方で処理することができる。

(1) アスファルト層において採用すべき載荷時間

車両走行に基づくアスファルト層において採用すべき載荷時間に関する研究については、Klomp, A.J.G.¹³⁾, Hofstra, A.⁹⁾, Barksdale, R.D.¹⁴⁾ らのものがあるが、そのいずれもアスファルト層に生ずるひずみまたは応力波形に着目し、その波形の中に載荷時間を定義することを試みている。研究者によって取り上げる波形も異なり載荷時間の定義も異なっていることから、どの手法が最も合理的であるかの判断は非常に困難であると思われる。

本研究ではアスファルト層下面に生ずる半径方向のひずみ (ϵ_r) 波形によるスティフネスと正弦波による複素弾性率を走行速度を考慮に入れて比較し、同一温度において弾性率を等値とする載荷時間を見出し、それをアスファルト層の載荷時間とすることを試みている。

4. において、プログラム波による場合と正弦波による場合のアスファルト混合物の弾性率と載荷時間の関係を、温度をパラメーターとして示した (図-4)。

両波形における弾性率-時間曲線は各温度においてほぼ相似形であることから、プログラム波による弾性率-時間曲線を時間軸に沿って平行移動させ、正弦波による弾性率-時間曲線に重ね合わせてみた。その結果、本研究の温度範囲 (-15~20°C) における各温度において、両者の弾性率-時間曲線は良い重なりを示すことが明らかとなった。

この手法は、アスファルト混合物の弾性率は温度と時間の関数として示されることから、温度を同一としたとき時間のみの関数となり、弾性率が等値であるならばそのときの載荷時間は当然等値であるとの考え方に基づいている。このことからプログラム波による弾性率-時間曲線と正弦波による曲線とを一致させるための移程量を求めることにより、プログラム波の載荷時間を決定することができる。すなわち正弦波における載荷時間 t_s ($t_s = 1/\omega$, ω : 角速度) とプログラム波における載荷時間 t_p (前出) との間には以下に示すような関係があることが明らかになった。

$$\log t_s = \log t_p + 0.16$$

$$t_s \approx 1.5 t_p$$

車両走行に伴う舗装体のアスファルト層における載荷時間は、アスファルト層下面に生ずる半径方向のひずみ波形において、圧縮から引張に変わる点から引張ひずみの最大値になる時間、 t_p に 1.5 を乗じた時間となる。

(2) アスファルト層の変形係数

層構造の弾性理論解法を用いて、図-1 に示した 3 層の舗装構造を例として取りあげ、アスファルト層の変形

係数を求めることを試みた。

正弦波を用いて測定したアスファルト混合物の複素弾性率-時間曲線(図-4)に時間・温度換算則を適用し、基準温度(T_0)を 10°C としたときの複素弾性率のマスターカーブを求める。そのときの移程量($\log a_T$)と温度の関係は付表に示されている。また各温度を基準として複素弾性率のマスターカーブ群(付図)を描く。なお付図には測定領域よりも高温($25\sim 40^{\circ}\text{C}$)におけるものも示されているが、その算出方法の詳細については付録に述べてある。

一方これらの複素弾性率のマスターカーブ群のかわりに、定ひずみ速度試験から得られる線型粘弾性領域内のスティフネスからそれらを求めることもできる。

図-9はアスファルト混合物の複素弾性率のマスターカーブ群の一部、および層構造の弾性理論解法を用いて算出したアスファルト層の載荷時間(前出)とアスファルト層の変形係数との関係を示したものである。図-9を得るための具体的な手順は付録に示してある。

なお図-9においては、便のため縦軸に載荷時間、横軸に弾性率(変形係数)を示してある。またアスファルト混合物の弾性率は、舗装が遭遇するような環境条件下(温度としては最低気温から最高気温+約 30°C 、載荷時

間としては 10^{-3} 秒から数日)で求められなければならないかもしれないが、アスファルト層の変形係数が路盤の変形係数を下まわる(変形係数の逆転)のような場合については除外することとする。このことからここではW.F.L.式(付録参照)を利用し、温度 $25\sim 35^{\circ}\text{C}$ におけるマスターカーブをも示しているが、変形係数 $8.25 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 以下の値は除いてある。

図-9より、車両走行速度をパラメーターとしたアスファルト層の載荷時間と変形係数との関係を示した曲線と複素弾性率のマスターカーブ群との交点が、各温度および各車両走行速度に対応したアスファルト層の変形係数(E_1)を与える座標点となる。またこれら各交点における時間は、車両走行に基づいてアスファルト層に生ずる正弦波に対応した載荷時間であると同時に、ある温度におけるアスファルト層の変形係数を与える載荷時間となる。

図-9には車両走行速度を $10\sim 120 \text{ km/hr}$ にとったときのアスファルト層の載荷時間と E_1 との関係を示してあり、アスファルト層下面に生ずる半径方向の最大引張ひずみと E_1 との関係も同時に示してある。

アスファルト層の変形係数、載荷時間、ひずみについて、図-9より以下に示すような事項が明らかにされた。

- a) 車両走行にともないアスファルト層に生ずる載荷時間は、3層構造において車速 $10\sim 100 \text{ km/hr}$ に対して $0.1\sim 0.01$ 秒すなわち 10^{-2} 秒のオーダーである。
- b) アスファルト層の変形係数が大となるほど、すなわち温度が低下するほど、車両走行速度が一定であってもアスファルト層における載荷時間は長くなる傾向を示す。
- c) 舗装体の温度 $-15\sim 35^{\circ}\text{C}$ において、輪荷重 5 t の車両が走行するときのアスファルト層の変形係数(E_1)ならびにアスファルト層下面に生ずる半径方向の最大引張ひずみ(ϵ_r)は、温度および走行速度によりかなり異なっている。このことをより明らか

表-6 アスファルト層の変形係数および半径方向の引張ひずみ

Velocity (km/hr)		Temperature ($^{\circ}\text{C}$)					
		35	25	10	0	-15	
10	E_1^*		0.81	2.4	4.2	7.0	
	ϵ_r^{**}		13.5	10.0	7.8	5.8	
60	E_1		1.3	3.1	4.9	7.2	
	ϵ_r		12.0	9.0	7.2	5.6	
120	E_1		0.85	1.6	3.3	5.1	7.4
	ϵ_r		13.2	11.5	8.8	7.0	5.4

* $E_1 \times 10^4 (\text{kg/cm}^2)$ ** $\epsilon_r \times 10^{-5}$

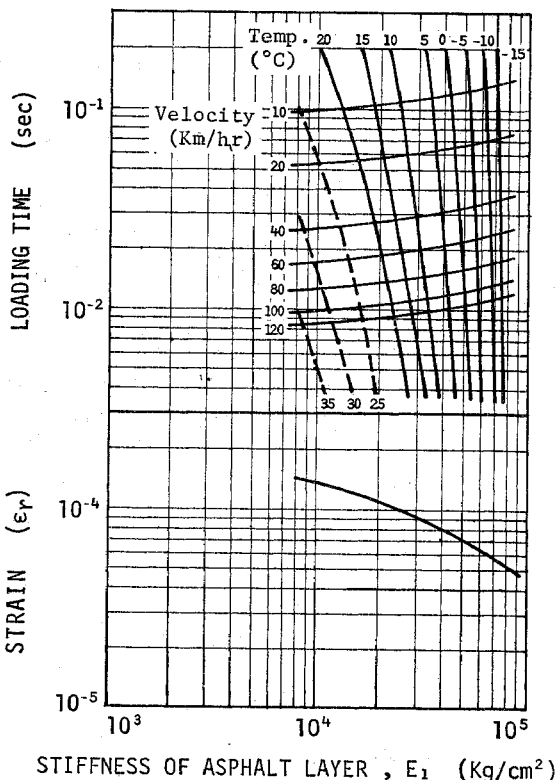


図-9 アスファルト層の変形係数と載荷時間および半径方向の引張ひずみとの関係

にするために、温度 $-15\sim 35^{\circ}\text{C}$ 、走行速度 $10\sim 120\text{ km/hr}$ における E_1 ならびに ϵ_r の値を表-8に示した。

表は、温度 25°C において走行速度が 120 km/hr から 10 km/hr に低下すれば最大引張ひずみは 1.17 倍となり、また走行速度 60 km/hr においては温度が -15°C から 25°C に上昇すればそれは 2.14 倍にもなることを示している。また -15°C 、 120 km/hr の場合と 25°C 、 10 km/hr の場合とでは後者の最大引張ひずみは前者の 2.5 倍ともなる。

以上のことより、車両走行にともないアスファルト層に生ずる引張ひずみを算出するときには、重要な入力データであるアスファルト層の変形係数が温度ならびに車両走行速度に大きく依存することから、温度ならびに車両速度を無視することができない。

7. 結 論

本研究において明らかにされた事項を要約すればおおよそ次の通りである。

(1) 3層構造の弾性理論解法を用いてアスファルト層下面における半径方向のひずみ分布を算出し、その波形をアスファルト混合物に入力し動的性状を求め、一方、通常この種の研究に用いられている正弦波による動的性状をも求め、両者の差異を明らかにした。

(2) アスファルト混合物の疲労破壊回数はアスファルト層としての荷重分散性能を保持する限界であるとの観点から、車両走行にともないアスファルト層下面に生ずるひずみ波形および正弦波により疲労試験を行い、繰り返し載荷過程における弾性率 (Stiffness Modulus) の変化を明らかにするとともに、両者の波形による疲労性状の差異を明らかにし、かつ関連づけを行った。すなわち正弦波に比し疲労破壊回数は約 $6.0\sim 24.6$ 倍にもなることを明らかにした。

(3) 同一温度において弾性率が等値であるならばそのとき探るべき載荷時間も等値であるとの観点から、アスファルト層における載荷時間の定義を試み、それはアスファルト層下面に生ずる半径方向のひずみ波形において圧縮から引張に変わる点から引張ひずみの最大値になる時間 (t_p) に 1.5 を乗じた時間となることを明らかにした。

(4) 車両走行にともないアスファルト層下面に生ずる引張ひずみを算出する際、重要な入力データとなるアスファルト層の変形係数の温度ならびに載荷時間依存性を明らかにし、舗装体の温度が既知のとき、車両走行速

度に対応した載荷時間を求め、最大引張ひずみの値を算出する手法を提案した。

筆者らは先に、アスファルト混合物への粘弾性論の適用の可否について、また実際の道路舗装において生ずるであろう載荷時間、温度、ひずみ領域においてアスファルト混合物の動的応答について論じ、さらに繰り返し載荷時の動的応答の変化について考察を加え、アスファルト混合物の動的性状について一連の研究を進めてきた。

本論文はそれらの研究成果を基礎として、アスファルト混合物の動的性状ならびに疲労性状を車両走行にともないアスファルト層に生ずるひずみ波形で論じ、層構造における理論解法において最も重要な入力データであるアスファルト層の変形係数を合理的に決定する方法を提案した。このことから、理論解法が今まで単に理論として発展してきたものを、車両走行速度をも考慮に入れた材料物性がより明らかにされ理論に組入れられるならば、舗装の理論設計の実用への適用がより実際のなものとなる。なお本研究において用いた舗装構造の力学的解については本学 芳村 仁 教授のご指導をいただき、牛尾 俊介、鈴木 征勝、森吉 昭博らの諸氏により作成されたプログラムを用いた。ここに関係各位に感謝の意を表する次第である。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。

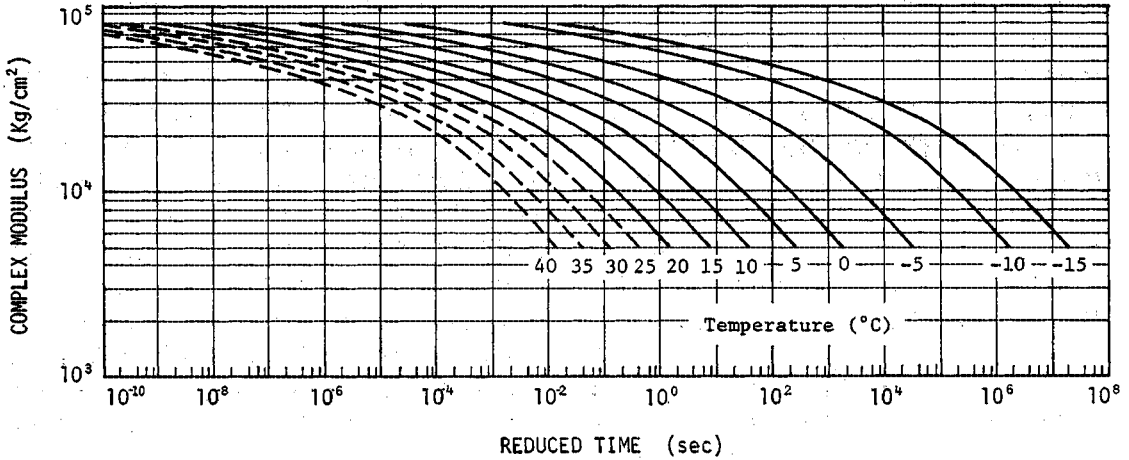
なお本研究は文部省科学研究費の交付を受けて実施したものである。

付 録

(1) 複素弾性率のマスターカーブおよび算出法

時間・温度換算則の原理からして、マスターカーブの形は温度によらず同一であるが、図上においてその位置するところは異なる。したがって、ある基準温度におけるマスターカーブおよび温度とシフトファクター ($\log a_T$) の関係の2者から、温度ならびに載荷時間が変化したときの複素弾性率を求めることができる。しかし計算等の手段が入るため実用には不便であることから、実用に供するため各温度におけるマスターカーブを描き、また W.L.F. 式を利用し、測定温度領域よりも高温 ($25\sim 40^{\circ}\text{C}$) におけるものも付図に示した。

アスファルト混合物はほぼ熱レオロジー的に単純な物質として取扱うことのできるものであることは、筆者らはすでに明らかにしている。たとえば温度をパラメータとしてアスファルト混合物の複素弾性率-時間曲線を表わすことができ、ある温度を基準温度 (T_0) とし他の温度における曲線を T_0 における曲線にまで平行移動さ



付図 複素弾性率のマスターカーブ群

付表 シフトファクター

Temp. (°C)	log aT	log aT from T _s
-15	5.70	5.94
-10	4.65	4.32
-5	2.94	2.97
0	1.72	1.83
5	0.85	0.85
10	0	0
15	-0.76	-0.74
20	-1.42	-1.40
25	—	-1.99
30	—	-2.51
35	—	-2.98
40	—	-3.41

せることによりマスターカーブを求めることができる。またこのときの移程量はシフトファクターとよばれ、log aT で表わされる。付表には基準温度 (T₀) を 10°C としたときの温度と log aT の値が示されている。

Williams, Landel, Ferry らは、熱レオロジー的に単純な物質について、各物質に固有の標準温度 (T_s) を適当に

致を示している。このことから、詳細な議論はあるにしても、標準温度 (T_s) を求めることにより、測定温度領域外の温度を含む任意温度におけるマスターカーブを描くことができるものと思われる。

(2) アスファルト層の変形係数の決定法

アスファルト層における載荷時間ならびに変形係数を求めるための手順は以下に示す通りである。

- 複素弾性率のマスターカーブ群 (付図) を用意する。
- ある温度においてアスファルト層の変形係数 (E₁) を仮定し、層構造の弾性理論解法によりアスファルト層下面の半径方向ひずみ (ε_r) と載荷面中心からの距離との関係すなわちひずみ分布を求める。
- 載荷面の中心からひずみがゼロとなる点までの距離 (L) を求め、車両走行速度 (V) との商として時間 (t_p = L/V) を計算する。
- 時間 t_p に先に求めた係数 1.5 を乗じてアスファルト層における載荷時間 t を求める。
- この載荷時間 t の値と b) において仮定した E₁ の値の座標点を a) において用意した図上にプロットする。
- E₁ の値を変化させ b)~e) の手順を繰り返し多くの座標点を求め、それらを結んで E₁ と t の関係を示す曲線を得る。
- E₁-t 曲線とマスターカーブ群との交点が各温度におけるアスファルト層の変形係数 E₁ を与える座標点となる。また交点における時間は、車両走行に基づいてアスファルト層に生ずる正弦波に対応した載荷時間であると同時にある温度におけるアスファルト層の変形係数を与える時間となる。

選択し利用するならば、すべての物質のシフトファクターの温度依存性が次式に示す一般式によってよく表わされることを明らかにした¹⁵⁾。

$$\log aT = -c_1(T - T_s) / (c_2 + T - T_s)$$

$$c_1 = 8.86$$

$$c_2 = 101.6$$

この関係は固体高分子に限らず、高分子溶液、ガラス形成能をもつ有機低分子化合物および無機ガラスなどについて、極めて広い温度領域、すなわちガラス転移温度 T_g からその 100°C 高温まで成立するとされている。

系に固有な標準温度 T_s 以外の任意の温度 T₀ を基準とすれば上式は以下のように表わすことができるとされている¹⁶⁾。

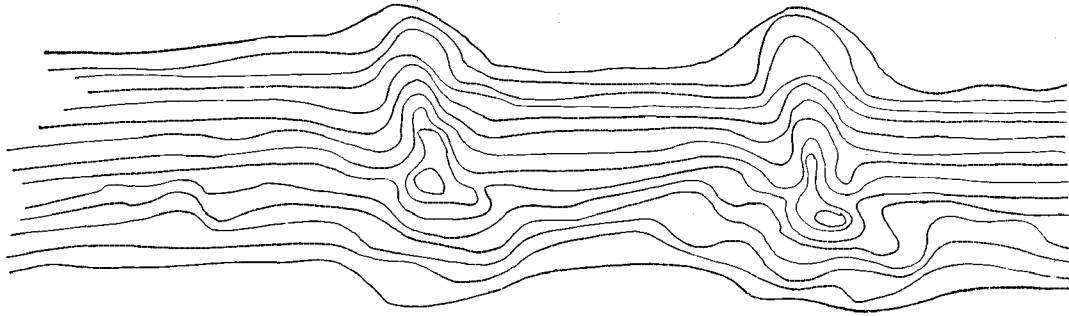
$$\log aT = -c_1 c_2 (T - T_0) / (c_2 + T - T_s)(c_2 + T_0 - T_s)$$

アスファルト混合物についてもこれらの関係が成立するとして、付表に示した温度と log aT の関係から標準温度 T_s を求めた結果、T_s = 36.3°C なる値を得た。またここで得られた T_s を用いて、各温度における log aT を算出し、その結果を付表に同時に示した。表を見るに、両者のシフトファクター (log aT) はかなり良い一

参 考 文 献

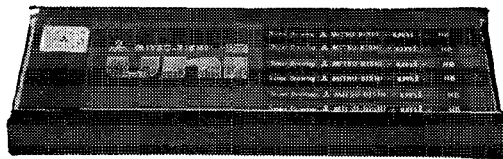
- 1) Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. : Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction, 1st Int. Nat. Conf. on the structural design of asphalt pavements, Michigan, 1962.
- 2) 笠原 篤・上島 壮・菅原 照雄 : 共振法によるアスファルトおよびアスファルト混合物の動的粘弾性, 土木学会論文報告集, 第208号, 1972.
- 3) Hofstra, A. and Valkering, C.P. : Comparison of laboratory measurements under simulated traffic conditions with theory, 3rd Int. Nat. Conf. on the Structural Design of Asphalt pavements, Vol. 1, 1972. その他多数
- 4) 笠原 篤・菅原照雄 : 繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について, 土木学会論文報告集, 第235号, 1975.
- 5) Burmister, D.M. : The theory of stresses and displacements in layered system and applications to the design of airport runways, Proc. 23rd-Annual Meeting of H.R.B., Vol. 23, 1943.
- 6) Schiffmann, R.L. : General analysis of stresses and displacements in layered systems, 1st Int. Nat. Conf. on the structural design of asphalt pavements, 1962.
- 7) Yoshimura, J., Ushio, S. and Sugawara, T. : Stress-strain multi layered systems, Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University, Vol. 13, No. 2, 1972.
- 8) Baker, R.F. : A structural design procedure for pavements, 1st Int. Nat. Conf. on the structural design of asphalt pavements, 1962.
- 9) Heukelom, W. and Foster, C.R. : Dynamic testing of pavements, Proc. of the A.S.C.E., SM 1, 1960.
- 10) 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.
- 11) van Dijk, W., Moreaud, H., Quedeville, A. and Uge, P. : The fatigue of bitumen and bituminous mixes, 3rd Int. Nat. Conf. on the structural design of asphalt pavements, 1972.
- 12) Proc. of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2, 1972.
- 13) Klomp, A.J.G. and Niesman, Th.W. : Observed and calculated strains at various depths in asphalt pavements, 2nd Int. Nat. Conf. on the structural design of asphalt pavements, 1967.
- 14) Barksdale, R.D. : Compressive stress pulse time in flexible pavements for use in dynamic testing, H.R.R., No. 345, Highway Soils Engineering 11 reports, 1971.
- 15) 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., Sos., 1955.
- 16) 小野木重治 : レオロジー要論, 樞書店, 1957.
(1976.3.26・受付)

長い線でも 同じ細さに



かき始めも 先端がくずれない

途中でもかき減りが少ない



9H-6B 17硬度 1ダース¥600

三菱鉛筆



トルクレットマシンによる

コンクリート吹付工法!

西ドイツ・トルクレット社の技術導入による完全施工。
工期短縮・工費節減に大きく役立ちます。

(御申込次第資料を御送付致します。)

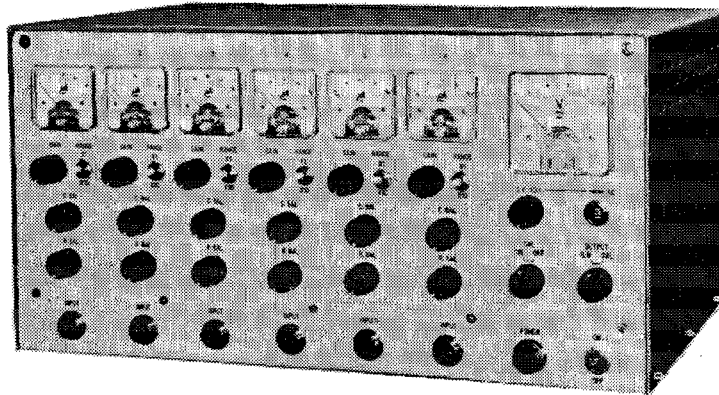
営業種目 / 特殊土木工事(トルクレットコンクリート吹付)、ボーリング、測量、物探、地質調査、一般土木工事、建築、その他

開発工事株式会社

社長 広田 孝一 ・ 専務 前沢 肥

東京都新宿区新宿1丁目76番地(共益ビル) 電話 東京(352)6251(代表) 6501 3/直営

水理実験波高解析にどうぞ!!



(CA-101型 水位計増幅器)

- ☆波高計(抵抗式)と記録器をつなげばOK
- ☆簡単な取扱いで直線性良好
- ☆価格低廉
- ☆豊富な納入実績を持っています

カタログ請求先

計測技研株式会社

東京都武蔵野市中町1丁目28番地3号
TEL (0422) (51) 8958

MARUI

短時間 厚さ及び構造物の弾性係数が判定 できる

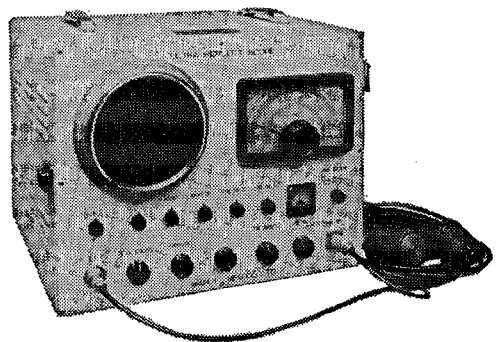
- ① 時間の節約になります (時代に即応)
- ② 正確な判断の参考資料となります
- ③ 無破壊で常に測定出来ます

用途

- 型枠取除き判定 (経済助力となる)
- ダム・コンクリート等の品質管理
- 道路隧道の厚さ及ボイドの判定
- コンクリートの経年変化・強度の推定等

営業品目

セメント・コンクリート・土質・アスファルト
水理各試験機・無破壊試験器・計量器・各種材料試験機



超音波反射測定器



株式
会社

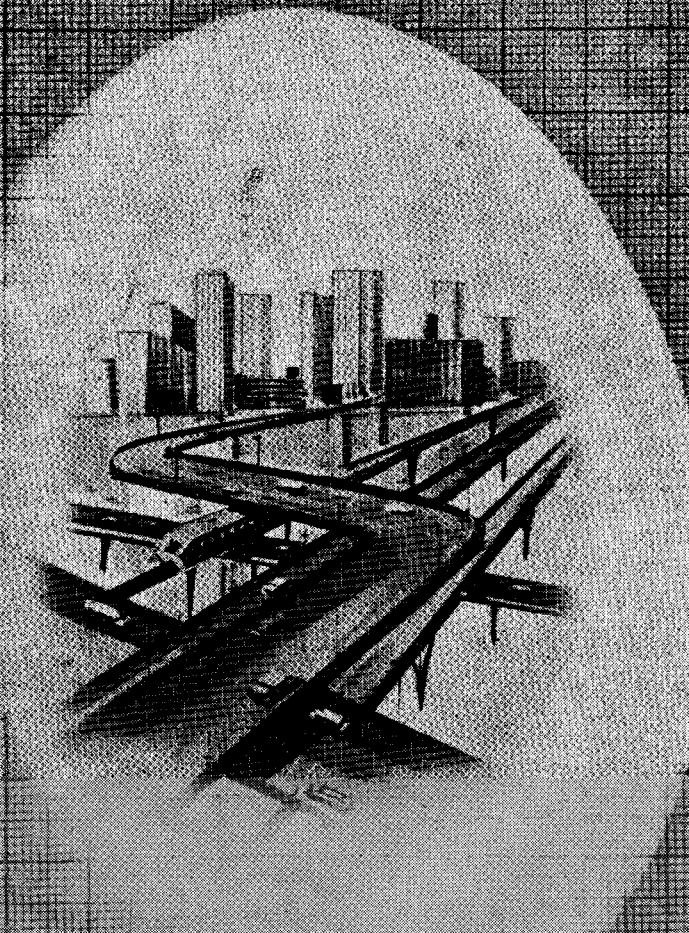
丸井製作所

本社 大阪市城東区蒲生町4-10番地
電話 大阪 931-3541 番(代表)
東京出張所 東京都港区西新橋3-9-5(吉田ビル)
電話 東京 431-7563 番

昭和三十七年五月二十八日第三種郵便物認可
昭和四十一年十一月二十五日
（毎月一回）
（二十日発行）

土
学
会
論
文
集
第
三
五
号

定
二
百
円



より豊かな 未来を設計する！

交通事業・プラント建設事業及びあらゆる産業の土木建築施設の
計画・調査・測量・設計・施工管理

●土木部門

建設コンサルタント登録 / 登録年月日 昭和39年12月8日 / 登録番号 第39-140号

測量業登録 / 登録年月日 昭和40年11月8日 / 登録番号 登録第(1)-1467号

●建築部門

一級建築士事務所登録 / 登録年月日 昭和40年9月25日 / 東京都知事登録 第5566号

東日建設コンサルタント株式会社

本社 / 東京都千代田区丸の内1-4 (新丸ビル) (株式会社日立製作所内) 電話 東京 (212) 1111 (大代表)

建築部門 / 同上

土木部門 / 東京都千代田区神田駿河台4の6 電話 東京 (255) 1011 (代表) (旧日立シビルコンサルタント(株))

茨城事務所 / 茨城県日立市幸町3-1-1 電話 日立 (2) 1111 (大代表)

大阪出張所 / 大阪市淀川区長柄中通り3の3 電話 大阪 (351) 6926

名古屋出張所 / 名古屋市中区栄3-17-12 日立製作所名古屋営業所内 電話 名古屋 (251) 3111 (大代表)