

# アスファルト混合物の応力-ひずみ曲線\* とその変形係数に関する一考察

## A Study Stress-Strain Curve and Modulus of Deformation in Asphalt Mixture.

荻野 正嗣<sup>1)</sup>

Shoji OGINO

大前 達彦<sup>2)</sup>

Tatsuhiko OHMAE

In a general way, Young's modulus of elastic body is defined the ratio of stress to strain and signifies as a peculiar constant in a material. Cement concrete is treated as elastic body approximately, and maintained a peculiar Young's modulus. However it doesn't always follow that the ratio of stress to strain of asphalt mix relates straight line, and greatly changes taking of stress, loading time, temperature and under various conditions. In constant-rate-of strain test of asphalt mix, it expresses as relaxation modulus ( $E=d\sigma/d\varepsilon$  at  $d\varepsilon/dt$ ).

This paper described how to calculate modulus of deformation from the behavior of deformation of stress-strain curve based on the date of static triaxial compression test results.

### 1. ま え が き

舗装の層構造解析をする上で弾性係数は重要なファクターである。一般に、弾性体の弾性係数は応力と歪の比で定義され、物質に個有の常数として示される。たとえば、セメントコンクリートは近似的に弾性体として取り扱い、個有の弾性係数を有している。

しかしながら、アスファルト混合物の破壊現象は極めて複雑な機構をもち、応力と歪の比は必ずしも直線関係にないので応力のとり方によって変わるほか、載荷時間、温度その他の種々の条件によっても大きく変わる。アスファルト混合物の定ひずみ速度試験においては、緩和弾性率 ( $E=d\sigma/d\varepsilon$  ただし  $d\varepsilon/dt$  に対して) として表現している。van del Poel<sup>1)</sup>はこの応力-歪の比を変形係数の一つとして、ステイフネスと定義し、温度と載荷時間の関数として示している。

本論文の初期目的は、アスファルト混合物の静的三軸圧縮試験結果より得られたデータを基にして、変形係数の求め方にあった。しかし、この変形係数を求めるにあたって、どうしても欠くことの出来ないアスファルト混合物の応力-歪曲線および変形挙動を述べなければならない。従って、本論文の構成は、

- (1) アスファルト混合物の応力-歪曲線
- (2) 変形係数の求め方
- (3) 変形挙動

の3つから成り立っている。

---

\*昭和58年3月11日原稿受理

1), 2) 大阪産業大学工学部土木工学科

なお、繰り返し載荷試験等から求められる複素弾性率 (complex modulus) およびレジリエントモデュラス (resilient modulus) については考慮していない。

## 2. 供試体および試験方法

### 2.1 使用材料

アスファルトは針入度92, 比重1.03, PI -0.73のストレートである。粗骨材は最大寸法13mmの硬質砂岩の砕石で, 比重2.72, 吸水量1.20%である。細骨材は天然の川砂で, 比重2.66, 吸水量1.63%である。フィラーは石灰岩粉末で, 比重2.71である。これらの合成粒度はアスファルト舗装網の密粒度アスコン粒度②のほぼ中央を通る配合とした。アスファルト量は7.5%である。

### 2.2 試験方法

供試体は静荷重  $191\text{kg/cm}^2$  で  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  になるように締め固めた円柱供試体である。試験はひずみ制御方式による静的三軸圧縮試験を用いて行なった。この試験機は軸荷重10t ( $127\text{kg/cm}^2$ ) まで載荷可能で, 動力部は無段変速機を使用している。試験に使用したひずみ速度は, 負荷されていない場合で毎分1.8mmの速さである。試験温度は25, 35, 45および $55^\circ\text{C}$ の4段階で, 側圧も0, 1, 2および $3\text{kg/cm}^2$ の4段階に変化させた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 応力-歪曲線

一般に, アスファルト混合物の破壊のモードは菅原ら<sup>2-3)</sup>によると, Fig. 1 で示されている。これらの研究は主に, 曲げ試験から行なったものである。

本実験では三軸圧縮試験結果から, 応力-歪曲線を図示したものが, Fig. 2~5である。Fig. 2 は試験温度 $25^\circ\text{C}$ の場合のもので, 側圧0, 1, 2および $3\text{kg/cm}^2$ の応力-歪曲線図である。立ち上りは必ずしも直線を示さなく, ある程度のひずみが生じた段階で応力-歪は部分的に一定値を示すことがある。さらに応力(あるいはひずみ)の増加とともに山形になる。この傾向は Fig. 3~5に示す温度35, 45および $55^\circ\text{C}$ の場合も同様である。すなわち, 圧縮試験における常温および高温領域におけるアスファルト混合物の破壊のモードは, Fig. 1に示されているⅢ型よりもややゆるやかなS型曲線を示すものと思われる。

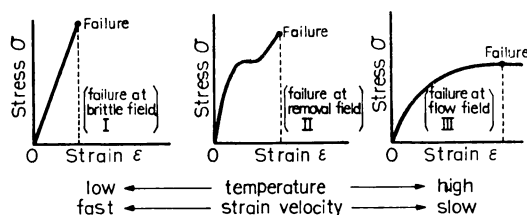


Fig.1 Mode of failure.

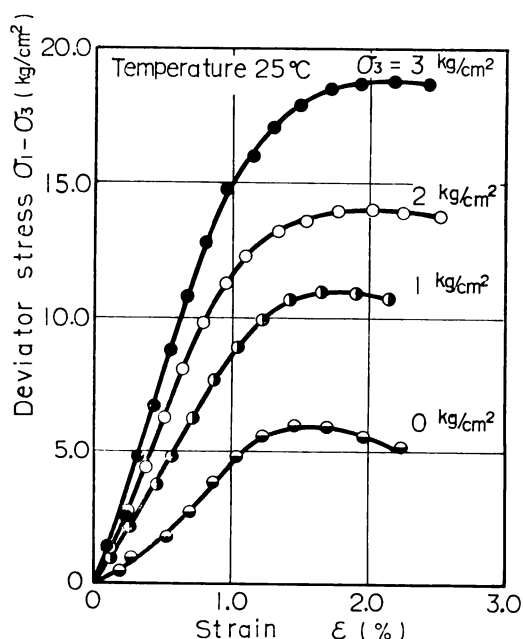


Fig.2 Comparison of stress-strain curves at various lateral pressure,  $25^\circ\text{C}$ .

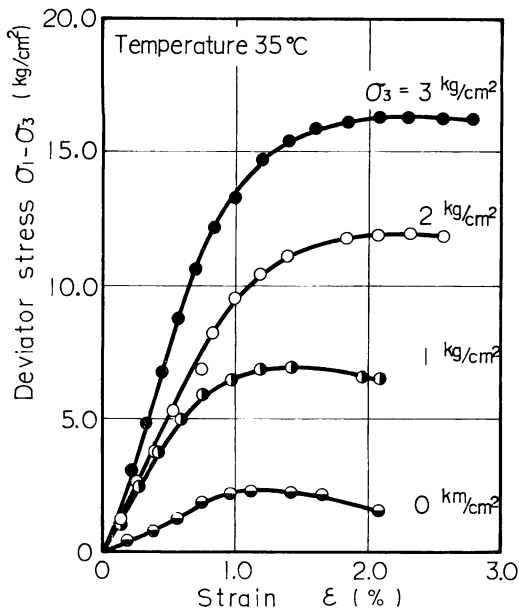


Fig. 3 Comparison of stress-strain curves at various lateral pressure, 35 °C.

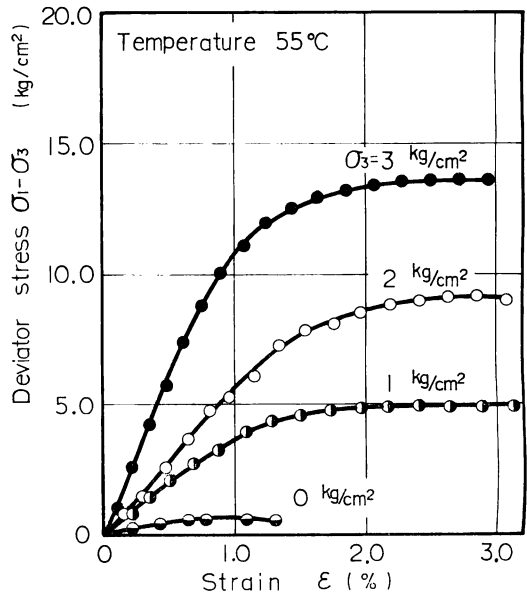


Fig. 5 Comparison of stress-strain curves at various lateral pressure, 55 °C.

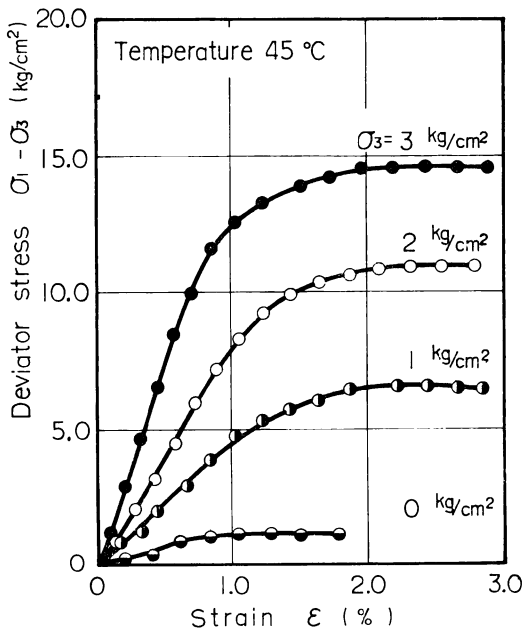


Fig. 4 Comparison of stress-strain curves at various lateral pressure, 45 °C.

### 3.2 変形係数 その1

一般に、セメントコンクリートの場合は純弾性係数、割線弾性係数および接線係数のような取り方によって多少ヤング率(弾性係数)は変わるけれども特に不都合は生じない。しかし、アスファルト混合物の場合、常温および高温では上述したように必ずしも応力-歪は直線関係ではなく、コンクリートの例にならって変形係数を求めることに問題はあるが、一応この項では割線弾性係数の求め方を採用した。すなわち、破壊時における応力とそれまでに生じた全ひずみとの比で示される割線弾性係数は、セメントコンクリートの場合、破壊近くでそれほどひずみが増加しないからさほど問題はないと思われる。しかし、アスファルト混合物の場合、破壊近くで応力の増加に比べてひずみの増加が非常に大きいので、正しい変形係数を求めることは出来ない。又、セメントコンクリートでは立ち上がりの部分はほぼ直線とみなしうる状態にあるが、アスファルト混合物は立ち上がりは直線関係を示さない。任意の直線と思われる部分、すなわち、 $E = d\sigma/d\varepsilon$  で示される緩和弾性率として変形係数を求めることとした。この求め方においても、どの時点で  $d\sigma/d\varepsilon$  を取るかによって、ずいぶん違った変形係数が求まるはずである。C. L. Monismith<sup>4)</sup> はアスファルト混合物の応力-歪の線形限度は、ひずみ 0.1% 生じる範囲内であることを示している。

実際のアスファルト舗装道路での最大ひずみを考えると、この範囲内で変形係数を求めることが理想的であるかも知れない。しかし、破壊が進行して行く過程ではさらに大きなひずみが生ずること、さらに室内試験において初期ひずみが0.1%内での変形係数を求めることは機械的および測定誤差を多少なりとも伴う。一方、土質試験では、破壊時における応力の $\frac{1}{2}$ に相当するひずみを用いて変形係数を求める方法を取っているので、ここではこの方法も試みた。なお、永久ひずみを除いた応力一歪の比で示される純弾性係数を求める方法は、アスファルト混合物では困難であるので除外した。

従って、この項では割線弾性係数に相応する変形係数（以後④の方法と呼ぶ）、緩和弾性率に相応する変形係数（⑤の方法）および土質試験で用いられている変形係数（⑥の方法）を求めて、一括表示したものが Table I である。Table I によると、⑤と⑥の方法で求めた変形係数は近似的に一致している。⑤の方法は上述したように、ほぼ直線とみなされる部分（本実験では0.2%から0.6%まで生じたひずみとこの間での応力）での変形係数を求めたものであるが、側圧 0kg/cm<sup>2</sup> の場合のように無理も生じてきそうなので⑥の土質試験法による方が無難であろう。④の方法は⑤、⑥に比べて、試験温度が高くなるにつれて変形係数は非常に小さい値になる。これは破壊近くで応力の増加に比べて、ひずみの増加が非常に大きくなるためである。

Temperature (°C)	Lateral pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus of deformation (kg/cm <sup>2</sup> )		
		Secant modulus (A)	Relaxation modulus (B)	Modulus of deformation by soil test method (C)
25	0	410	410	400
	1	670	910	860
	2	700	1400	1300
	3	860	1600	1600
35	0	190	220	220
	1	490	790	860
	2	510	990	1000
	3	700	1600	1500
45	0	91	130	170
	1	300	460	470
	2	430	830	810
	3	600	1500	1500
55	0	77	88	110
	1	200	400	400
	2	320	560	560
	3	500	1200	1200

Table I Modulus of deformation calculated three method.

### 3.3 変形係数 その2

前項では割線弾性係数、緩和弾性率および土質試験による方法によって変形係数を求めたものであるが、筆者らは別の方法で変形係数を求めることにした。

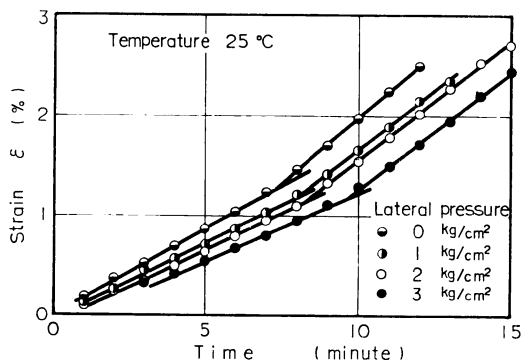


Fig. 6 Relations between strain and the time elapsed until failure, 25 °C.

今、Fig. 2 における温度 25°C、側圧 0 kg/cm<sup>2</sup> の応力一歪曲線をみると、立ち上がり部分が凹曲線でひずみが増加するに従って凸曲線になって破壊に至る S 形曲線である。この供試体について、破壊に至るまでの荷重時間を横軸に、ひずみを縦軸にとって図示すると Fig. 6 の最上部の線のようになる。この図によると、ひずみはある荷重時間までは一定の割合でひずみ、ある時間（ここでは 7 分 10 秒）で折線となって破壊（最大強度）まで進む。2.2 項で述べたように、この試験のひずみ速度は、負荷されていない場合、毎分 1.8 mm

の割合でひずむように無段変速機をセットして荷重したにもかかわらず、あるひずみ量でそのひずみ速度は変わっている。すなわち、あるひずみ量が生ずるまでは一定のひずみ速度で進むが、破壊近傍で急にひずみ速度が大きくなる。これは供試体そのものが破壊に至っていないが、供試体内部になん

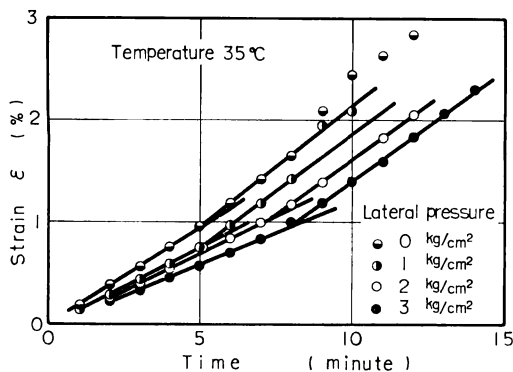


Fig. 7 Relations between strain and the time elapsed until failure, 35 °C.

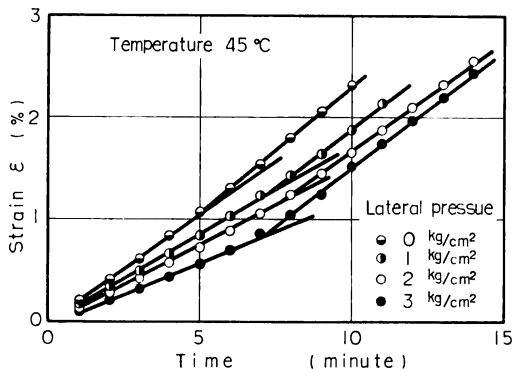


Fig. 8 Relations between strain and the time elapsed until failure, 45 °C.

Temperature °C	0 kg/cm <sup>2</sup>	1 kg/cm <sup>2</sup>	2 kg/cm <sup>2</sup>	3 kg/cm <sup>2</sup>
	$\times 10^{-3}/\text{sec}$	$\times 10^{-3}/\text{sec}$	$\times 10^{-3}/\text{sec}$	$\times 10^{-3}/\text{sec}$
25	2.65	2.52	2.13	1.63
35	3.14	2.65	2.38	2.00
45	3.47	2.73	2.46	1.96
55	3.46	2.78	2.78	2.20

Table I Strain velocity at variable test conditions.

試験機の動力部に大きく従属される。しかしながら、Fig. 6～9に示されているように、あるひずみ量でひずみ速度が直線的に変化している。これは試験機そのものの性質ではなく、この時点で供試体内部に何らから異状が生じたために起ったものと考えるのが妥当であろう。今、この折点における応力とひずみを、それぞれ変曲応力および変曲ひずみと呼ぶこととし、変曲点の応力とひずみとから変形係数を求めると Table III のようになる。

らかの変化が生じたものと思われる。側圧 1, 2 および 3 kg/cm<sup>2</sup> についても同様である。温度 35, 45 および 55 °C の場合の結果を Fig. 7, 8 および 9 に示してあるが、これらの場合も、あるひずみ量でひずみ速度が変わっている。

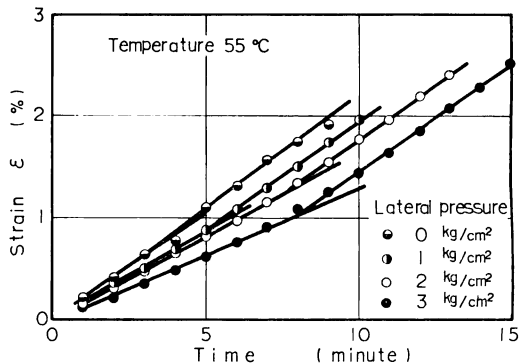


Fig. 9 Relations between strain and the time elapsed until failure, 55 °C.

これらの図から明らかなように、試験温度および側圧の状態によって初期ひずみ速度が違っている。これらの値を一括表示したものが Table II である。試験温度が低いほど、側圧が大きいほどひずみ速度が小さくなっている。言い換えると、供試体強度が大きいほどわずかであるがひずみ速度が遅くなっている。この点だけ考えるなら、供試体に荷重を掛けてゆくにつれて、歪一載荷時間の関係は曲線を示すはずである。すなわち、使用している

Temperature °C	Lateral pressure Q <sub>s</sub> kg/cm <sup>2</sup>	Breaking strength (σ <sub>s</sub> -σ <sub>0</sub> ) kg/cm <sup>2</sup>	Variation strain ε %	Stress at variation strain (σ <sub>s</sub> -σ <sub>0</sub> ) kg/cm <sup>2</sup>	Variation stress Breaking strength %	Modulus of deformation kg/cm <sup>2</sup>
25	0	6.0	1.24	5.5	91.7	440
	1	11.0	1.14	10.0	90.9	880
	2	14.0	1.14	12.5	89.2	1100
	3	18.8	1.18	16.4	87.2	1200
35	0	2.3	0.90	2.1	91.3	230
	1	6.9	0.78	5.9	85.5	760
	2	11.9	1.04	9.6	80.7	920
	3	16.3	0.94	13.1	80.4	1400
45	0	1.2	1.02	1.1	91.7	110
	1	6.6	1.26	5.5	83.3	440
	2	10.9	1.14	8.8	80.7	770
	3	14.6	0.84	11.5	78.8	1400
55	0	0.6	0.62	0.55	91.7	89
	1	4.9	0.84	3.2	65.3	380
	2	9.2	1.26	6.9	75.0	550
	3	13.7	1.09	10.9	79.6	1100

Table III Modulus of deformation calculated from variation strain.

#### 4. 追加試験

3項まで述べてきた実験結果について、ある程度の確信は得ていたが、一末の不安はないわけではなかった。そこで、別の試験機および供試体作成条件を変えて同様の実験を試みた。

その実験に使用した粒度配合は前者と同様であるが、アスファルト量は5.0%である。供試体作成はニーディングコンパクターで、まず、 $\phi 10 \times 23 \text{cm}$  になるように成形し、両面カッティングして  $\phi 10 \times 20 \text{cm}$  の供試体とした。さらに、初期載荷時の偏心荷重がかからないようにするため、供試体上下面にエポキシ系接着剤で加圧板を固定した。試験は油圧式万能試験機（圧縮200t）を使用し、一軸圧縮を行なった。試験は19°Cである。縦ひずみ測定はダイヤルゲージ、横ひずみはひずみゲージを用いて実施した。供試体数は6本である。

Fig. 10はある任意の1本の供試体から、Fig. 6～9と同様に、ひずみと破壊に至るまでの経過時間との関係を示したものである。横ひずみは明らかに曲線を示すが、縦ひずみは前者と同様の傾向を示している。ストレイン・ペーサー付きの、いわゆる F.B. (Feed Back) された定ひずみ度試験を実施した場合、縦ひずみと破壊に要する時間との関係は一次函数（直線）となる。本実験に使用した試験機は前者と同様、F.B. されておらないが、やはり一つの折線をもつ直線を示すことが明らかとなった。一方、Fig. 11は応力に対する縦ひずみ、横ひずみおよび体積ひずみの変化を示したものである。上述したように、偏心荷重等がかからないように、細心の注意を払って実施したが、やはり応力と縦ひずみの関係はS型曲線となる。横ひずみおよび体積ひずみはセメントコンクリートと同様の曲線が求められ、限界応力をも示される。しかしながら、これらの関係と破壊との相関関係は見られなかった。

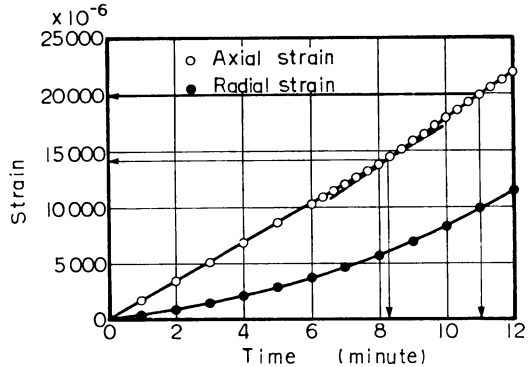


Fig. 10 Relations between strain and the time elapsed until failure.

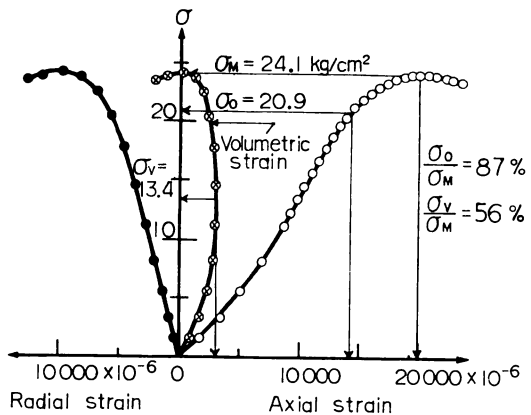


Fig. 11 Axial strain, radial strain and volumetric strain curves VS stress.

#### 5. ひずみ一載荷時間における変曲点について

セメントコンクリートの応力とひずみの関係を両対数グラフにプロットすると、あるひずみで折点が生ずる。<sup>5)</sup> 本実験の応力とひずみの関係を両対数あるいは片対数グラフにプロットしても何らかの変化も見られなかったが、ひずみと破壊に至る経過時間との関係をプロットするとあるひずみ量で折点が生ずることがわかった。この変曲ひずみについては Table III に示しているが、巨視的にみて、ひずみ1.03%（平均）で変曲点を示している。すなわち、ひずみが約1%程度ひずむと供試体内部に何らかの変化が生じたものと思われる。この原因については現段階では明らかでないが、ほぼ変曲ひずみが一定値を示していることからバインダーの粘性に関係があるかも知れない。又、Table III に示

している破壊応力に対する変曲応力の比をみると、側圧が大きいほどその比は小さくなる傾向にあるが、全平均を求めると83.9%となる。このうち、いずれの試験温度の場合も一軸圧縮（側圧 0kg/cm<sup>2</sup>）の場合、約92%を示している。すなわち、アスファルト混合物の一軸圧縮の場合、破壊強度の90%前後で破壊への第一歩を踏み出しているものと思われる。

## 6. あとがき

本報告はアスファルト混合物の変形挙動および変形係数の求め方を述べたものである。この変形係数と一般にアスファルト混合物において求められる緩和弾性率との値を比較しても、さほど大きくは変わらない。しかし、ひずみ約1%生ずると、供試体内部に何らかの異状を生じることが明らかとなった以上、この変曲点での応力とひずみの比で求める方が妥当のように思える。

## 参 考 文 献

- 1) van der Poel, C. Jour. Appl. Chem. Vol. 4 1954.
- 2) 菅原他, 土木材料Ⅲ (アスファルト), 共立出版株式会社.
- 3) 菅原他, 土木学会論文報告集, 201, 1973.
- 4) C, L. Monismith, etc, Proc., AAPT, Vol. 35, 1966.
- 5) 吉本彰, 材料試験, 第7巻, 57号, 昭和33年6月.