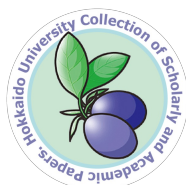




HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	流動を伴う領域におけるアスファルト混合物のレオロジーならびに破壊挙動について
Author(s)	森吉, 昭博; 菅原, 照雄
Citation	土木学会論文報告集, 279, 127-135
Issue Date	1978-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40182
Type	journal article
File Information	moriyoshi_PJSCE279.pdf



流動を伴う領域におけるアスファルト混合物の
レオロジーならびに破壊挙動についてRHEOLOGY AND FAILURE BEHAVIOR OF BITUMINOUS MIXTURE
IN VISCO-ELASTIC ZONE

森 吉 昭 博*・菅 原 照 雄**

By Akihiro MORIYOSHI and Teruo SUGAWARA

1. 概 説

本論文は舗装用アスファルト混合物に曲げ応力あるいは圧縮応力を生ぜしめた場合得られる力学性状を、主として応力・ひずみ・時間に関する3次元座標から論じ、曲げおよび圧縮の一定ひずみ速度試験、クリープ試験および応力緩和試験の各種実験結果について検討したものである。

アスファルト舗装には走行車輛のような短時間の荷重から駐車時のような長時間の荷重や日没による温度低下、降雨に基づく温度変化に伴う熱応力に至るまでさまざまな形の外力が作用するため、載荷状態によりこれらの破壊の形態や荷重に対する応答は著しく異なる。したがって、短時間の荷重に関する研究は疲労破壊等を対象にして周期的な外力をアスファルト混合物に作用させ、それから得られる動的諸性状について検討する¹⁾。一方、長時間の荷重に対する研究はクリープや応力緩和の各試験から混合物の力学性状を論ずるのが一般的である^{2), 3)}。

アスファルト舗装の力学性状は実用的見地からすれば微小変形領域から大変形領域まで一貫して論ずる必要があるにもかかわらず、いまだ十分に論じられているとはいえない。このため本研究は、アスファルト舗装の種々の破壊現象を十分に解釈し、解析するためにアスファルト混合物について前述の種々の試験を行い、これらから得られる力学性状を、力学的に線形として取扱える領域から、非線形領域に至るまで一貫して論ずることを試みた。アスファルト混合物の破壊包絡線(破壊強度と破壊時のひずみの2次元表示)の形状は温度およびひずみ速度に無関係に一定⁴⁾であるが、もし時間をも含めた3次元表示が可能ならばそれは混合物の性状をより適切に表現できるものと思われる。一方、このような表示が可

能となれば応力緩和過程に生ずるかも知れない破壊、または応力緩和現象と破壊現象との関連、およびこれら種々の試験から得られる力学性状の間の関係等をもいっそう明確に表現できるように思われる。

実験は脆性破壊領域から流動を伴う破壊領域まで広範囲な領域について行ったが、本論文では主として後者のみを対象とし以下の点について考察を試みた。

1. 破壊包絡面の存在の確認
2. 応力・ひずみ曲線からクリープ性状および応力緩和性状の推定
3. 応力緩和過程での破壊の有無
4. 応力・ひずみ・時間の関係

2. 実験、解析の方法ならびに試料

本研究では以下のような実験を行った。

曲げ試験：両端単純支持、中央集中荷方式
供試体寸法 (cm)：

$$2.5 \times 2.5 \times 25, \text{ スパン長 } 20$$

a. 一定ひずみ速度試験

変位速度 (mm/min) : 0.5~8000

供試体下縁のひずみ速度 (1/sec) :

$$3.1 \times 10^{-5} \sim 1.9 \times 10^{-1}$$

試験温度 (°C) : -15~30

b. クリープ試験

設定応力までの変位速度 (mm/min) : 3

設定応力までのひずみ速度 (1/sec) : 1.9×10^{-4}

設定応力：一定ひずみ速度試験における破壊強度
の 70, 50 および 30%

試験温度 : (°C) 0, 5, 10, 15, 20

c. 応力緩和試験

設定応力までの変位速度 (mm/min) : 3

設定応力までのひずみ速度 (1/sec) : 1.9×10^{-4}

設定応力：一定ひずみ速度試験における破壊強度

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

の 70, 50 および 30%

試験温度 (°C) : 0, 5, 10, 15

圧縮試験 : 供試体寸法 (cm) $4 \times 4 \times 8$

a. 一定ひずみ速度試験

変位速度 (mm/min) : 0.5~300

ひずみ速度 (1/sec) : $6.2 \times 10^{-2} \sim 2.1 \times 10^{-4}$

試験温度 (°C) : -20~60

b. クリープ試験

設定応力までの変位速度 (mm/min) : 3

設定応力までのひずみ速度 (1/sec) : 6.3×10^{-4}

設定応力 (kg/cm²) : 10, 20 および 40

試験温度 (°C) : 0, 10

c. 応力緩和試験

設定応力までの変位速度 (mm/min) : 10

設定応力までのひずみ速度 (1/sec) : 2.1×10^{-4}

設定応力 (kg/cm²) : 10, 20, 30, 35

試験温度 (°C) : 20

なお、本実験に用いた載荷装置、恒温水槽ならびに解析法はすでに報告したもの^{5), 6)}と同一なので、ここでは省略する。

実験は再現性や精度のことを考慮し、密度管理を厳重に行ったうえ、同一の条件について3本以上の供試体を使用した。使用混合物は密粒度アスファルトコンクリートであり、この配合と使用バインダーの性状は付表に示す。

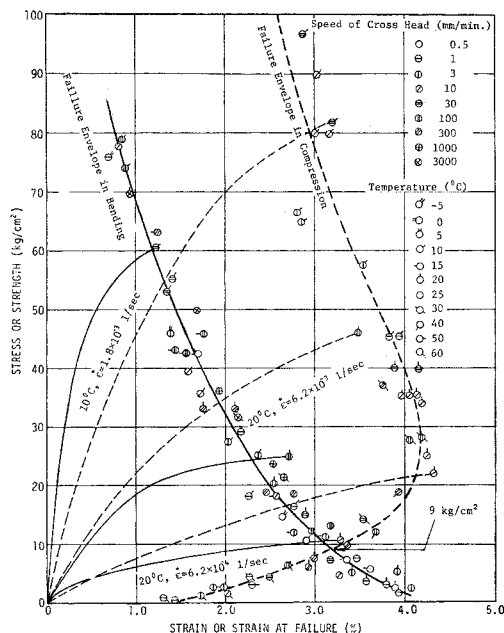
厳重に供試体の密度管理を行っても実験値にはばらつきが生ずる。このばらつきと破壊強度等との関連性について検討するため応力・ひずみ曲線の代表的なものを3つ選び、おのおの6本ずつを用い試験温度 10°C、ひずみ速度 1.3×10^{-4} , 6.3×10^{-4} および 3.1×10^{-3} 1/sec のもとで曲げ試験を行った。結果は表一¹に示すごとく、低応力部においては強度のばらつきが少ないものの破壊時のひずみのばらつきが多く、一方、高応力部ではこの逆の傾向にあることが確認された。この傾向は上島¹¹⁾らによっても報告されているが、これらの原因については明確ではない。

3. 曲げと圧縮の破壊包絡線

図一¹は曲げと圧縮の破壊包絡線（厳密にはあるばらつきをもつ帯とみなすべきものであろう）とおのお

表一¹ 曲げ試験における実験値のばらつき

Rate of Strain (1/sec)	Average of Flexural Strength (kg/cm ²)	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)	Average of Strain at Failure	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
1.3×10^{-4}	21.3	0.51×10^0	2.4	2.5	3.5×10^{-1}	14
6.3×10^{-4}	38.3	1.4×10^0	3.7	2.1	1.2×10^{-1}	5.7
3.1×10^{-3}	70.6	4.2×10^0	5.9	1.6	0.87×10^{-1}	6.0



図一¹ 曲げと圧縮の応力・ひずみ曲線および破壊包絡線

のの応力・ひずみ曲線を示す。圧縮の破壊包絡線は圧縮強度が約 25 kg/cm² で破壊時のひずみは極大値を示し、これより低応力領域においては圧縮強度の減少に伴い破壊時のひずみはわずかに減少する傾向となる。これに対し、曲げの破壊包絡線は曲げ強度の減少とともに破壊時のひずみは増加する傾向にある。ここで、破壊時のひずみが極大値となるひずみを限界ひずみと定義すると、このひずみは圧縮で約 4.2%，曲げでも約 4.2% とほぼ同一の値である。

曲げと圧縮の応力・ひずみ曲線の形状を比較すると、高応力領域では同一の温度およびひずみ速度でも曲げの応力・ひずみ曲線が圧縮のそれよりも高応力領域に位置しているものの、低応力領域ではこの逆の傾向にある。また、低応力領域で応力・ひずみ曲線の初期の勾配は曲げよりも圧縮のそれが小さい。線形として取扱うことのできる領域での緩和弾性率が応力・ひずみ曲線の接線勾配に等しい⁷⁾ こと、およびこの領域で温度・時間の重ね合せの原理が導入できることを考えれば⁷⁾、短時間載荷時の緩和弾性率は圧縮よりも曲げのそれが大きく、長時間領域ではこの逆の関係にあるといえよう。これらの事実は圧縮と曲げの各応力緩和試験における両者の力学性状の差を明確に表現しているものとして興味深い。

4. 破壊に至るまでの載荷時間

破壊強度とひずみ速度との関係は 図-2, 3 にみられるごとく温度をパラメーターとして規則的に変化する。曲げ試験 (図-2) において同一の曲げ強さを得るには 10°C の温度上昇は ひずみ速度で約 12 倍の変化に対応するのに対し、圧縮試験 (図-3) で同様の処理をすると 10°C の温度上昇は ひずみ速度や温度により異なるが、ひずみ速度で約 5~50 倍の変化に対応している。

図-2, 3 において温度とひずみ速度の換算が可能と仮定⁸⁾、曲げ強さおよび圧縮強度とひずみ速度の各マスターカーブを描くとそれぞれ 図-2, 3 における点線で示した曲線が得られる。このときのひずみ速度は、“換算ひずみ速度”であるが以降単にひずみ速度とよぶこととする。マスターカーブ作製時のシフトファクターは 図-4 に示すようなものになる。

アスファルト混合物の破壊に至るまでの載荷時間は 図-2, 3 と 図-1 より容易に計算され、これを破壊強度と破壊に至るまでの“換算時間” (以降単に時間とよぶ) として整理すると 図-5, 6 が得られる。この処理

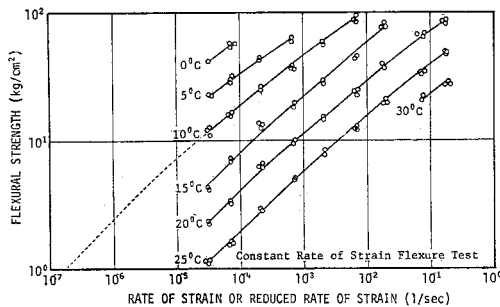


図-2 曲げ強さとひずみ速度または換算ひずみ速度との関係

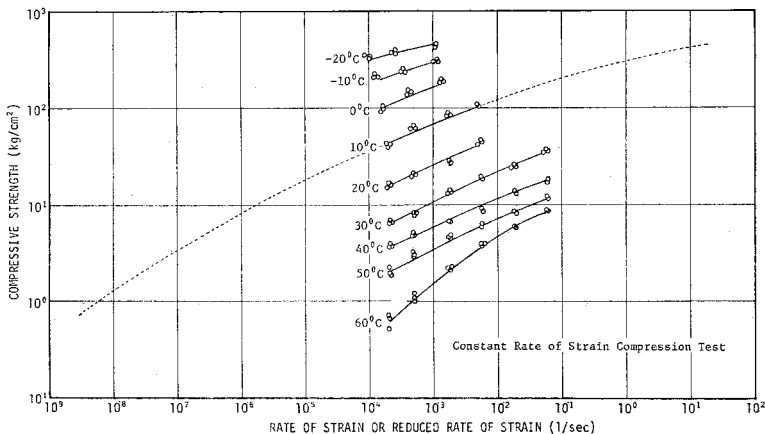


図-3 圧縮強度とひずみ速度または換算ひずみ速度との関係

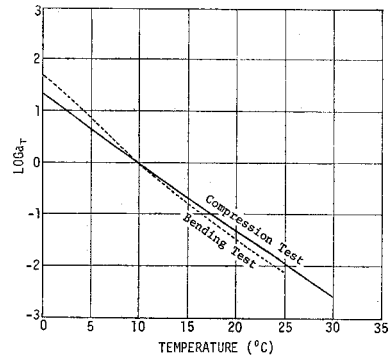


図-4 曲げと圧縮のシフトファクターと温度との関係

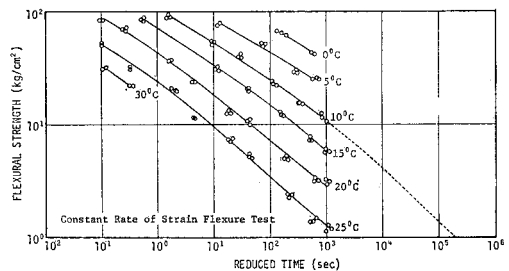


図-5 曲げ強さと換算時間との関係

により曲げ試験では $10^{-1} \sim 10^3$ 秒の載荷時間領域から、 $10^{-1} \sim 2 \times 10^5$ 秒まで、一方、圧縮試験では $5 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^2$ 秒から $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^6$ 秒に至るまでの広範囲な載荷時間領域における破壊強度がおのおのの推定可能となる。

図-1 において圧縮の破壊包絡線は曲げのそれよりも低応力領域においては小ひずみ領域に位置しているため、高温かつ長時間載荷領域においてアスファルト混合物は曲げよりも圧縮作用を受ける方が破壊しやすいかに見える。しかし、時間を考慮すると必ずしも圧縮作用を受ける方が曲げ作用を受けるよりも破壊しやすいとはいえない。

この点を明らかにするため、圧縮と曲げの各破壊強度とひずみ速度との関係 (図-7) と 図-1 より、破壊強度と破壊に至るまでの時間との関係 (図-8) を求めた。これらの図より、ひずみ速度が同一の場合曲げ作用を受ける方が圧縮作用を受けるよりも破壊に至るまでの時間は短いことは明白である。図-7, 8 に示した○印は 図-1 における曲げと圧縮の破壊包絡線が交叉する破壊強度 (この場合

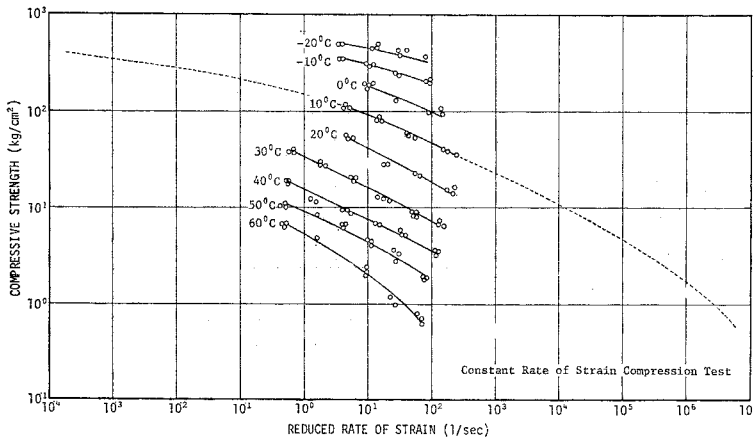


図-6 圧縮強度と換算ひずみ速度との関係

9 kg/cm²) を示す。破壊強度が 9 kg/cm² 以下の低応力領域においては圧縮作用を受ける場合の破壊に至るまでの時間は曲げ作用を受けるそれよりもかなり長い。この理由は 図-7 にみられるごとく、低応力領域において同一の破壊強度となるひずみ速度が、曲げと圧縮では前者がほぼ一桁大きいために、その領域の破壊時のひずみの値が多少変化しても破壊に至るまでの時間は、曲げ作

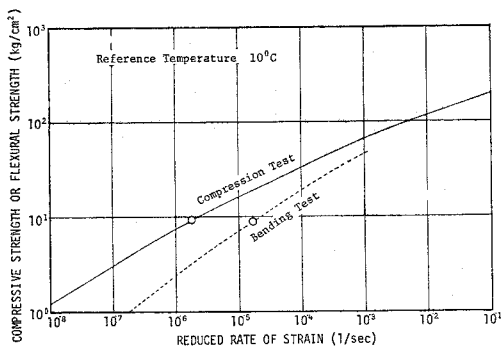


図-7 圧縮強度または曲げ強さと換算ひずみ速度との関係

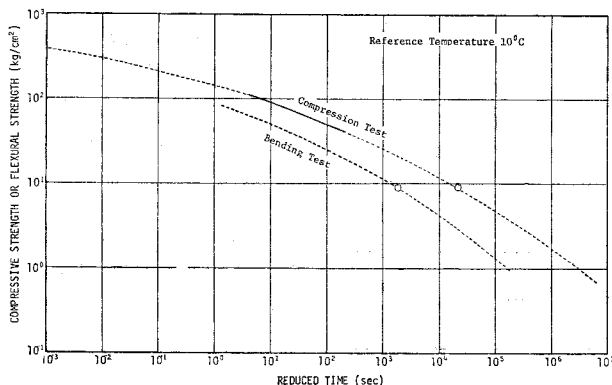


図-8 圧縮強度または曲げ強さと換算時間との関係

用を受ける方が圧縮作用を受けるよりも長くなるものと解釈すべきであろう。

5. 破壊包絡面の存在の確認

一定ひずみ速度試験において温度が異なる場合で破壊強度および破壊時のひずみの各値が同一となると、それらのひずみ速度は当然異なるため、破壊に至るまでの時間も異なる⁵⁾。しかし、破壊包絡線の考え方のみでは時間の要素が消されているため破壊現象を単

に 2 次元的にしかとらえることができない。これに対し、時間をも含めた 3 次元表示をすると時間軸方向に奥行のある破壊包絡線の連続の面、すなわち破壊包絡面が存在することがうかがえる。アスファルト混合物のクリープ性状と応力緩和性状との結びつけを図るにはどうしてもこの考え方が必要となる。

図-9 はこの考え方に基づき、アスファルト混合物の応力・ひずみ・時間の関係を一定ひずみ速度試験から得られる結果を 3 次元の模式図で示したものである。これによると一定ひずみ速度試験から得られる、ある温度 (T_1) における応力・ひずみ曲線 (図中の実線) は、ひずみ・時間面に垂直で、ひずみ座標軸とある角度をなす平面上を移動する。この曲線群の破壊点を結ぶと図中の太線の実線で示される破壊包絡線が得られる (このものは 図-1 に示すような破壊包絡線と同一のものである)。ま

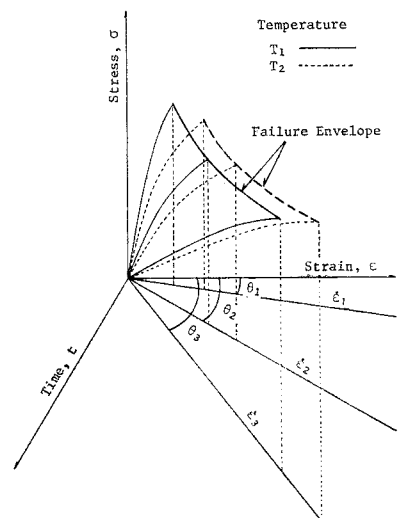


図-9 応力・ひずみ時間および破壊包絡線の模式図

た、別の温度 (T_2) における応力・ひずみ曲線は図中に点線で、また、この時の破壊包絡線は太線の破線で示す。この2つの破壊包絡線は応力・ひずみ面に投影するとまったく同一の曲線を形成するものの、時間軸を加えた3次元座標では相異なった曲線として示される。ここで種々の温度を想定するとこれらの曲線群は1つの面を形成する。ここではこの面を破壊包絡面と名付けることにする。

6. 破壊包絡面作製の近似的手法

アスファルト混合物の破壊包絡面を描く場合以下に示す事項が明らかにされていなければならない。すなわち、

- (1) 破壊強度と破壊時のひずみとの関係
- (2) 応力とひずみの関係

である。

(1) の事項は筆者らがすでに破壊強度と破壊時のひずみとの関係、すなわち破壊包絡線が温度とひずみ速度に依存しないでほぼ一定の関係にあることを明らかにしている⁹⁾。本研究ではこの関係に最小自乗法を適用し、実験式を求めた結果次式を得た。このときの残差平方和は18.9、また、標準偏差の推定値は0.40であった。

$$\sigma_B = 120.64 - 58.44 \varepsilon_B + 7.28 \varepsilon_B^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- σ_B : 曲げ強さ (kg/cm²)
 ε_B : 破壊時のひずみ (%)

ただし、

$$3 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_B < 80 \text{ kg/cm}^2$$

$$0.8\% < \varepsilon_B < 4\%$$

(2) については以下のような検討を行った。すなわち、曲げ試験から得られた応力・ひずみ曲線で形状の異なるものを6種選び、曲げ強さが74 kg/cm²のときの応力・ひずみ曲線で曲げ強さの98%までの曲線を基準にとり、この曲線と曲げの強さの異なる他の応力・ひずみ曲線の曲げ強さが92~96%までの曲線とが最大応力および最大ひずみ量で同一として整理したものに最小自乗法を適用し、実験式を求めた結果、次式が得られた。

$$\sigma = \sigma_B \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_B} \right)^{2.35} \right]^{0.60} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- σ : 曲げ応力 (kg/cm²)
 σ_B : 曲げ強さ (kg/cm²)
 ε : ひずみ (%)
 ε_B : 破壊時のひずみ (%)

ただし、

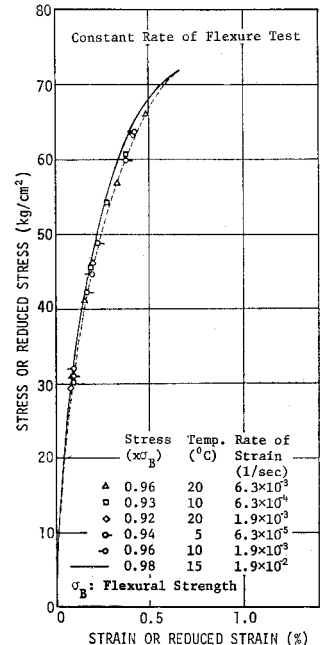
$$10 \text{ kg/cm}^2 < \sigma < 74 \text{ kg/cm}^2$$

$$0.9\% < \varepsilon < 2.9\%$$

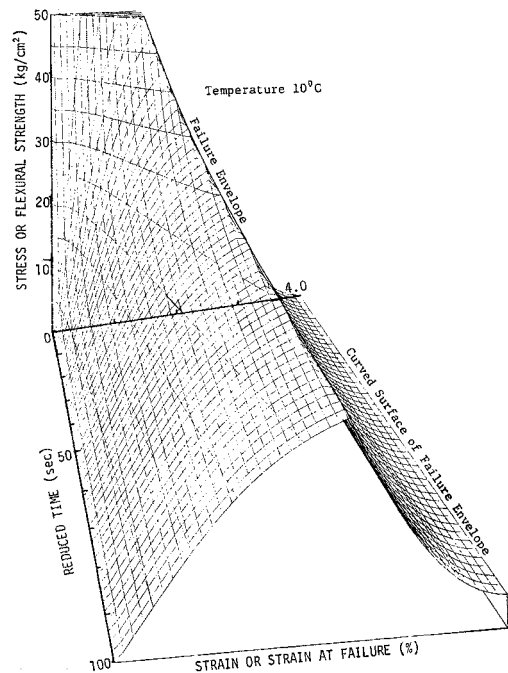
この実験式は図—10にみられるごとく実測値のひずみとの誤差は最大で0.05%、応力との誤差は最大で3 kg/cm²であるため、破壊点近傍までの応力・ひずみ曲線の形状はほぼ同一の実験式であらわすことが可能であるといえよう。しかし、破壊点まで同様の整理を行うと実験式と若干のずれが生ずるが、これは破壊包絡線が一本の曲線というよりむしろある幅をもつ曲線であるために生ずると考えるべきものである。

圧縮試験について

これと同様の試みをしたところ、応力・ひずみ曲線で、曲げのそれと同様の正規化はできなかったため、曲げ試



図—10 実測(実線)の応力・ひずみ曲線と図に示す最大応力でひずみもこの曲線のものとして整理した応力・ひずみ曲線



図—11 曲げの応力・ひずみ・時間の関係ならびに破壊包絡面の形状

験の結果と同じような処理は不可能となり、このため破壊包絡面は作製できなかった。

図—11 は上で述べた手法を用い、曲げ作用を受けるアスファルト混合物の応力・ひずみ・時間の関係を 10°C において求めた結果である。ここで、破壊包絡線は破壊包絡線の尾根の右側の曲面であり、また、細い実線は等時曲線、等応力線および応力緩和曲線をそれぞれ示している。この図を用いるとアスファルト混合物の破壊性状と応力・ひずみ・時間との関係を見出すことが容易である。

図—11 においてこの尾根の手前の曲面を応力・ひずみ面に投影すると 図—11 の破壊包絡線と一群の応力・ひずみ曲線が得られる。ここである一定のひずみで切りとられる曲面を応力・時間面に投影すると一群の応力緩和曲線が得られる。また、ここで等応力により切りとられる曲面をひずみと時間の面に投影すると一群のクリープ曲線が得られる。このようにして得られる種々の曲線は近似曲線であるがこれらの曲線は実測値を用いて求めることも可能である。すなわち、クリープ曲線は温度一定でひずみ速度を変化したとき得られる一群の応力・ひずみ曲線で等応力となるときひずみ量とこれらのひずみ速度を利用し、ひずみと載荷時間との関係として求め、一方、応力緩和曲線は一群の応力・ひずみ曲線で等ひずみとなるときひずみとこれらのひずみ速度から求めることが可能である。以下に実測値として示す曲線は近似的手法を用いず後者の手法を利用して直接求めたものである。

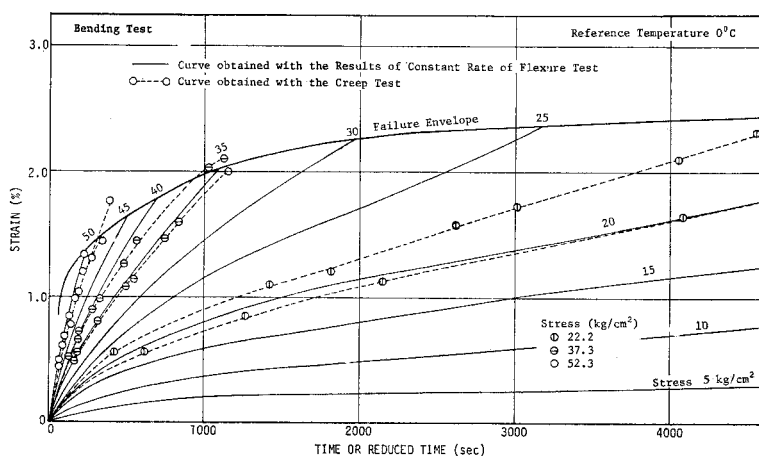
7. 推定したクリープ性状と実測のクリープ性状との関係

アスファルト混合物のクリープ試験時の破壊時の性状と一定ひずみ速度試験から得られるそれとを破壊包絡線の形で比較すると、工学的には両者の性状がほぼ同一であることはすでに知られている。ここでは破壊に至るまでの時間経過とひずみとの関係について両試験の結果から

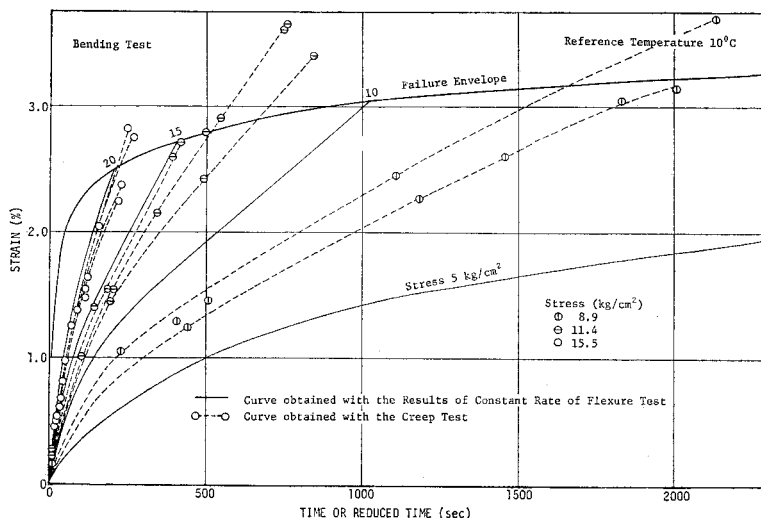
検討する。

一定ひずみ速度試験から得られた種々の応力・ひずみ曲線を利用し、これから直接等応力時におけるアスファルト混合物のひずみ・時間曲線を求めると 図—12 に示したような実線で示した曲線群が得られる。一方、丸印と破線で示した実測のクリープ曲線は設定応力まで一定ひずみ速度で載荷し、その後クリープ試験を行ったときのひずみと時間との関係を示す。図—13 は設定温度が 10°C における結果である。これらの結果から、低応力領域においては推定したひずみ・時間曲線が若干高ひずみ領域に位置し、温度が上昇するにつれ両者の曲線が互いにわずかながらずれる傾向にあるものの、概して推定した曲線と実測のそれとは比較的良好一致しているといえよう。

圧縮試験の結果にこれと同様の処理をすると 図—14



図—12 曲げのクリープ曲線における実測値と推定値の比較



図—13 曲げのクリープ曲線における実測値と推定値の比較

が得られる。両者の曲線は 10°C では応力 $7\sim 9\text{ kg/cm}^2$ 程度の差があり、推定曲線の方が必ず低ひずみ領域に位置している。

クリープ試験時における破壊時のひずみは図-12~14 にみられるごとく、多少破壊点のばらつきがあるものの、曲げ試験および圧縮試験から得られた破壊包絡線付近に存在する。この事実はクリープ破壊強度と一定ひずみ速度の破壊強度が同一であるというきわめて重要な結果を示すものである。

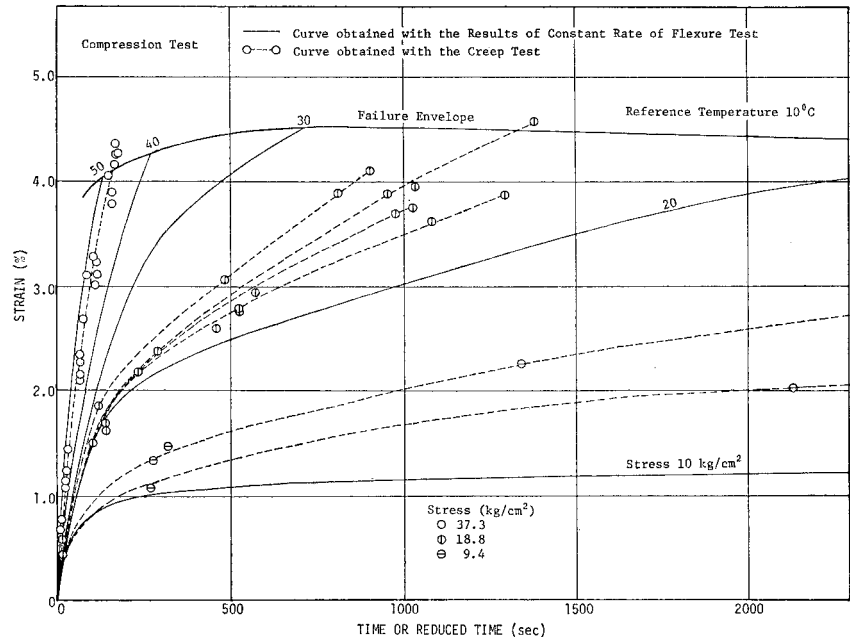


図-14 圧縮のクリープ曲線における実測値と推定値の比較

ひずみが減少する傾向がみられる。このことは圧縮の応力緩和過程で混合物が破壊する可能性のあることを示しているとみられる。このため 図-17 に示すように破壊包絡線を横切る形で応力緩和試験を行い、この点について検討した。この結果、圧縮の応力緩和過程で混合物は破壊しないことが確かめられた。

また、図-17 において応力がほぼ完全に緩和したと思われる状態で再度初期設定変形速度と同一の速度で載荷すると破壊点は破壊包絡線より高ひずみ領域に位置

8. 応力緩和性状

(1) 推定した応力緩和性状と実測の応力緩和性状との関係

図-15, 16 は曲げおよび圧縮の一定ひずみ速度試験から前節と同様の手法を用い、応力と時間との関係、すなわち応力緩和性状を計算により求め、この曲線と実測値とを比較した結果であり、図中の上部太線は破壊包絡線である。曲げ試験においては推定した応力・時間曲線は初期ひずみ量が 0.1% 程度までは比較的良好に一致しているものの、初期ひずみ量の増大とともに推定曲線は実測のそれより若干高応力側に位置する。一方、圧縮試験においては初期ひずみ量が 0.7% でも両曲線の形状はまったく異なったものとなった。

(2) 応力緩和過程での破壊の有無

圧縮の破壊包絡線は図-1で示したように低応力領域で破壊強度の減少に伴い、破壊時のひ

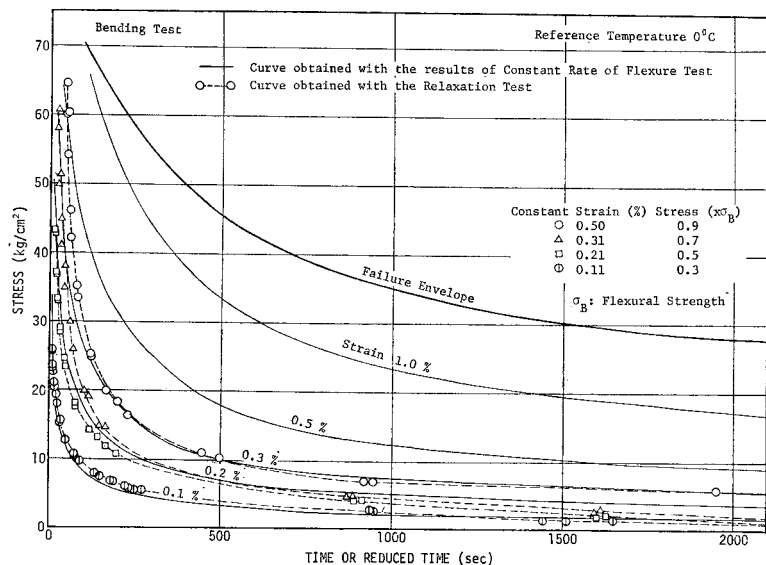
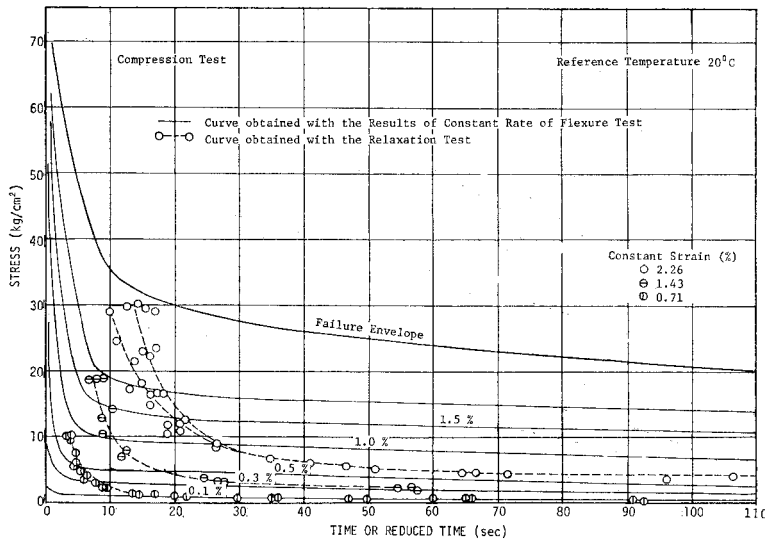
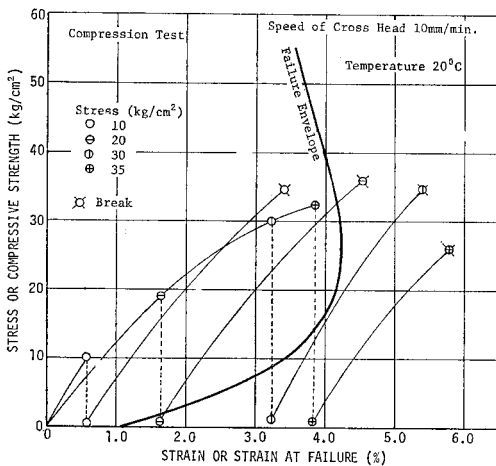


図-15 曲げの応力緩和曲線における実測値と推定値の比較



図—16 圧縮の応力緩和曲線における実測値と推定値の比較



図—17 圧縮の応力・ひずみ曲線と破壊包絡線との関係

付表 混合物の配合表

Sieve Opening (mm)	Asphalt concrete Type
13	100.0
10	92.0
7	75.0
5	68.0
2.5	47.0
1.2	36.0
0.6	25.0
0.3	13.9
0.15	7.2
0.074	6.1
Asphalt	6.0

Binder Property
 Penetration 95(25°C, 100 gr, 5 sec)
 Softening Point 47.0°C
 Penetration Index P.I. = -0.3

し、かつ一定ひずみ速度試験から得られた破壊強度とはほぼ同一の破壊強度となるものの、破壊時のひずみが増加した形となることが確められた。これと同様の試験を曲げ試験に適用したところ、応力緩和過程での破壊現象は現われず、圧縮試験同様、応力緩和試験後再度載荷したものの破壊点も破壊包絡線より高ひずみ領域に位置することが確

認された。

9. 結 論

本研究より得られたおもな結論を要約すると以下のとおりである。

(1) アスファルト混合物の力学性状は応力・ひずみ・時間の3次元表示をするといっそう明確に表現できる。

(2) アスファルト混合物の破壊現象においては破壊包絡線よりも破壊包絡面を考える方がより合理的である。

(3) 一定ひずみ速度試験の力学性状とクリープ性状および応力緩和性状との間にはある範

囲内では密接な関係が存在することが確められた。

(4) アスファルト混合物は圧縮および曲げの応力緩和過程で破壊しない。

以上述べた一定ひずみ速度試験からクリープ性状ならびに応力緩和性状を推定する方法はある範囲内では実測値とよく一致することが確められたものの、特に応力緩和試験の初期ひずみ量が大きい領域では両曲線の差が顕著となる。この原因は一定ひずみ速度試験における応力回復と応力緩和試験におけるそれとが同一でないためであると考えられる。このため応力・ひずみ・時間の関係を示す曲面で非線形と思われるような領域では応力緩和曲線群の上側に位置しているため、これをひずみ、時間面、および応力、時間面に投影するとこの影響は後者の方が前者と比較して著しく大きくなると考えられる。

本研究はさらに拡張すると任意の外力および温度のもとにおけるアスファルト混合物の力学性状を推定することが可能であるばかりか、応力緩和性状と破壊現象との関係、繰返し載荷試験における混合物の性状評価等、各種の応用が考えられるため、現在この点について検討中であり、機会を得て発表したいと考えている。

参 考 文 献

- 笠原 篤・岡川秀幸・菅原照雄：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，土木学会論文報告集，第254号，pp. 107~117，1976年10月。
- C.L. Monismith, G.A. Secor and K.E. Secor: Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete, Proc. AAPT, Vol. 34, pp. 248~285, 1965.
- 重松和男・橋原 健・内藤 匠：アスファルトフェーシング工法の開発研究(その4)ーフィリダム表面アスファルト遮水壁の温度応力についてー鹿島建設技術研究所年報，

- 第 21 号, pp. 27~42, 1972 年.
- 4) 森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げの破壊包絡線に関する研究，土木学会論文報告集，第 251 号，pp. 107~112, 1976 年 7 月.
 - 5) 森吉昭博・上島 壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，第 210 号，pp. 57~64, 1973 年 2 月.
 - 6) 上島 壮・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究，土木学会論文報告集，第 221 号，pp. 73~80, 1974 年 1 月.
 - 7) Teruo Sugawara; Mechanical Response of Bituminous Mixture under Various Loading Conditions, Proc. 3rd Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 343~353, Sept. 1973.
 - 8) 菅原照雄・上島 壮・森吉昭博：アスファルト混合物の低温領域における破壊時のレオロジー挙動，土木学会論文報告集，第 234 号，pp. 131~141, 1975 年 2 月.
 - 9) 岡崎隆雄・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊に関する研究，土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 243, 1976 年.
 - 10) 渡辺暉彦・渡辺 隆・柳沢茂樹：アスファルト混合物の破壊強度について，土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 242, 1976 年.
 - 11) 川野敏行・笹木国春・上島 壮・中島昭雄：アスファルト合材における試験値のばらつきについて，土木学会第 26 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 331~332, 1971 年.

(1978.1.21・受付)

土木学会誌・論文報告集総索引	1915～1975	8000円
日本土木史	昭和16年～昭和40年	36000円
	大正元年～昭和15年	24000円
土木製図基準	昭和51年版	2800円
製図のかき方		2500円
海外建設工事の契約・仕様		6000円
建設プロジェクトの進め方		2800円
水理公式集		5000円
水理公式集例題集		1800円
構造力学公式集		6600円
コンクリート標準示方書	昭和52年版	2800円
コンクリート標準示方書解説	昭和52年版	3200円
遠心力大径PC杭設計施工指針案		1000円
鋼構造架設設計指針		2500円
高炉スラグ砕石コンクリート設計施工指針(案)		800円
開削トンネル指針	昭和52年制定	2450円
沈埋トンネル耐震設計指針案		1000円
海上作業足場の設計要領		2000円
ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針		1100円
ダムの地質調査		2800円
わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望		15000円
土木技術者のための岩盤力学	昭和50年版	12000円
鋼鉄道橋設計標準解説	昭和49年版	3300円
国鉄建造物設計標準解説	昭和49年版	4500円
斜張橋資料集成		14000円
港大橋工事誌		30000円
関門橋工事報告書		30000円
東京港トンネル工事誌		30000円
構造物の安全性・信頼性		5000円
地下構造物の設計と施工		4700円
土木材料実験指導書	昭和52年版(基礎編)	700円(基礎編・応用編)1500円
土木構造実験	昭和52年版	550円
衛生実験指導書(プロセス編)		1800円
〒160 東京都新宿区四谷1丁目 土木学会 ☎ 355-3441 (販売) 振替東京 6-16828		