

アスファルト混合物の一軸圧縮破壊特性

FAILURE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES AT
UNCONFINED COMPRESSION TEST渡 辺 隆*・渡 辺 暉 彦**・元 田 良 孝***
By Takashi WATANABE, Teruhiko WATANABE and Yoshitaka MOTODA

1. 概 説

アスファルト混合物の破壊に関する性質は複雑である。一般に破壊自体が定量的に扱いにくい現象であることもその一因であるが、混合物では特に

① 試験条件（温度、載荷速度、応力状態など）によって強度、破壊時のひずみ量、破壊の形態が大きく変化する。

② アスファルトは組成が一定でない物質で、同規格の材料を用いても製造方法、原油産地によって力学的性質が異なる。

③ 供試体の作成方法が力学的性質に影響することがあげられる。

このようにパラメーターが多いため、破壊現象を一般的に扱った研究は数少ない。

一般にアスファルト混合物の破壊時の特性は、

① ひずみ速度の増加、あるいは試験温度の低下により強度は増大する。われわれは先に砂フィラー混合物の一軸圧縮強度について

$$\sigma_b = C \varepsilon^\alpha e^{B/T} (P - P_0) \dots\dots\dots (1)$$

という実験式を見い出している¹⁾。

(σ_b : 圧縮強度, ε : ひずみ速度, T : 試験温度, P : 骨材充填率, C, α, B, P_0 : 定数)

② ひずみ速度、温度によって破壊ひずみ量に変化する。

③ 破壊の形態が試験条件によって異なり、低温あるいはひずみ速度大において脆性的な破壊、高温あるいはひずみ速度小において流動的な破壊を起こす。などである。

筆者らはアスファルト混合物の破壊特性を研究するた

めに近年高分子分野で T.L. Smith の唱えた破壊包絡線 (Failure envelope) の考え方²⁾ をアスファルト混合物に適用した。粘弾性物質の破壊は、

① 試験条件によって支配される要素

② 物質の内部構造に起因する要素

に依存する。②はわれわれの場合、骨材配合、アスファルト量などに相当する。Smith は合成ゴムなどの高分子材料について上に述べた2つの要素を分離するために“破壊包絡線”なるパラメーターを導入して、試験条件に支配される要素を消去できることを見い出した。本研究では Smith の考え方をアスファルト混合物の一軸圧縮特性に導入し、破壊特性について考察をした。この結果混合物にも Smith の考え方を適用できることがわかり、複雑な破壊現象を統一的にとらえられることが判明した。

2. 破壊包絡線理論

本研究の根拠となった破壊包絡線理論について概略を説明する。この理論は 1960 年頃、Stanford 研究所の T.L. Smith によって発表された無定形高分子物質の破壊に関する考え方である。高分子物質もアスファルト混合物同様に試験条件によって破壊時の応力とひずみが複雑に変化するが、彼は広範囲な試験条件（温度、ひずみ速度）の下で引張試験をした結果、破壊時の応力 σ_b と破壊時のひずみ ε_b が試験条件によらない、一つの関数を成すことを見い出した。

すなわち

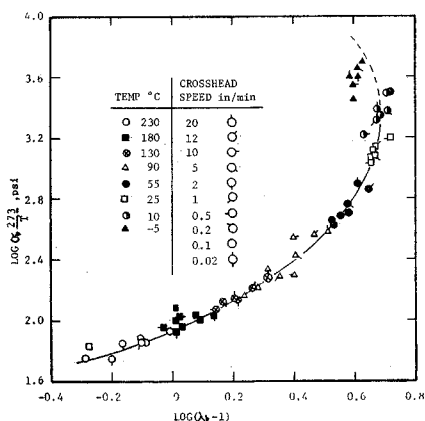
$$F(\sigma_b, \varepsilon_b) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

と表現できる包絡線 (Envelope) を描くことが判明した (図-1³⁾)。図-1 は加硫されたゴムについての包絡線である。おのおのの点は破壊時の応力とひずみ量を示している。応力軸には T_0/T という温度補正項がかけられている。 T は試験温度、 T_0 は任意に選ばれた温度

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 建設省土木研究所 研究員

図一 高分子物質の破壊包絡線の例³⁾

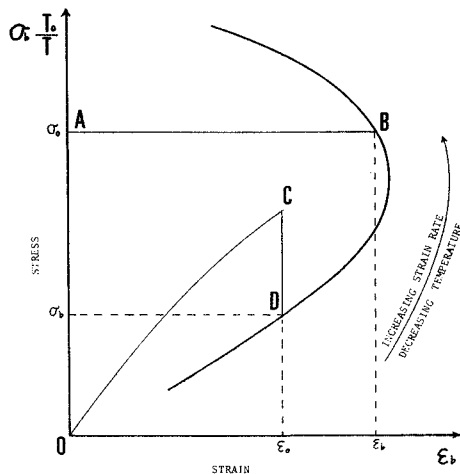
で、共に絶対温度である。一般にゴムなどの高分子物質は絶対温度に比例するエントロピー弾性を示し

$$P = -T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる⁴⁾。ここで P は弾性力、 $\partial S/\partial l$ はエントロピー S の物質の伸長による変化である。したがって式(3)に $1/T$ をかけると温度の影響を消去できる。破壊に至るまで物質がエントロピー弾性に支配されるか否かはまた別の問題であるが、Smith は補正をすることによって包絡線が滑らかに描けることを報告している⁵⁾。

図-2 は理論の説明図である。試験温度の低下あるいはひずみ速度の増加は一般に強度を増大させ、破壊点は包絡線上を反時計方向に移動する。

包絡線のほかの性質に、試験方法に独立ということがある。ここで指す試験方法とは、応力緩和、クリープ、定ひずみ(荷重)速度試験などのことであり。曲げ、引張り、せん断といった区別ではない。また疲労などの繰り返し载荷試験も含まない。たとえば一軸圧縮ならば、



図二 包絡線の説明図

応力緩和、クリープなどによって得られる破壊包絡線は同じものとなるわけである。クリープ試験では応力は一定であるからひずみは図-2で $A-B$ 上に沿って伸長し B 点で破壊する。応力緩和試験では逆にひずみが一定であるから、 $C-D$ 上に沿って応力が緩和し、 D 点で破壊する。

要約すると破壊包絡線は試験条件、方法に独立な、物質の内部構造を示す一つのパラメーターであると考えられる。包絡線は破壊の基準を示しているとも考えることができる。線の内側では物質は非破壊で存在し、線上の条件で破壊する。したがって線の外側の条件を満たすことは不可能である。先に述べたが、応力には温度補正がしてある。ゆえに厳密には包絡線は温度に独立ではない。しかし試験温度範囲がそれほど広くなければ補正による影響は無視できるほどである。たとえば図-1において、同一のひずみ速度では -5°C から $+230^{\circ}\text{C}$ の間に強度は約 100 倍変化するが、補正項はただか 2 倍弱しか変わらない。破壊包絡線の物理的意味については未だ不明の点が多いが⁶⁾、時間-温度換算則に匹敵する粘弾性物質の本質的な性質であると考えられる。

3. 試験材料、方法

実験に用いた配合を表-1に、アスファルトの諸元を表-2に示す。開粒、密粒、修正トペカ混合物では骨材の最大粒径は 13 mm である。供試体の寸法は高さ 10 cm、直径 5 cm の円筒型である。締め固めは約 120 $^{\circ}\text{C}$ において上下端に 1 t の荷重を 1~2 秒载荷した。

表-1 配 合

Sand-Filler Asphalt
Sand.....diameter 0.3~0.6 mm
Filler.....Okutama Tankaru

FC	0	20	40	60	80	100
AC	20	26	30	34	38	42

$$FC = V_f / (V_f + V_s) \times 100$$

$$AC = V_a / (V_f + V_s) \times 100$$

V_f : Volume of Filler

V_s : Volume of Sand

V_a : Volume of Asphalt

	Modified Topeka	Dence Graded	Open Graded
Asphalt Content (Weight Percent)	8	6.8	5

表-2 アスファルトの諸元

等 級	20-40	60-80	80-100 (I)	80-100 (II)	100-120	150-200
針 入 度	27	67	90	89	117	190
軟化点 ($^{\circ}\text{C}$)	57.0	47.5	45.5	46.0	44.0	39.0
P.I.	-1.1	-0.9	-1.2	-0.8	-0.6	-1.1

試験機は万能型圧縮試験機を用いた。試験条件は温度が -20°C から $+60^{\circ}\text{C}$ までで、この間を 10°C ないしは 20°C おきに 5~9 段階にとってある。ひずみ速度は 5×10^{-4} , 2.5×10^{-3} , $1 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ の 3 段階である。アスファルト混合物の試験としてひずみ速度の大きいほうではないが、これ以上のひずみ速度については現在検討中である。

4. アスファルト混合物への理論の適用性

(1) 破壊包絡線

図-3 は砂フィラー混合物の包絡線を示している。理論より予想されるように温度が下がるにつれて、あるいはひずみ速度が増加するにつれて破壊点が線上を反時計

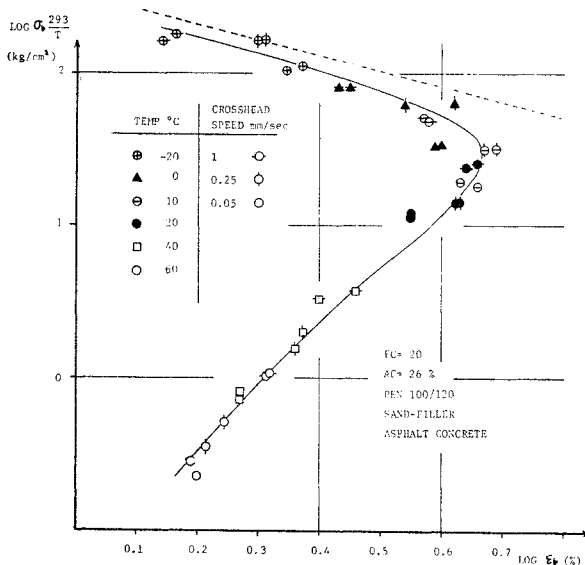


図-3 アスファルト混合物の破壊包絡線

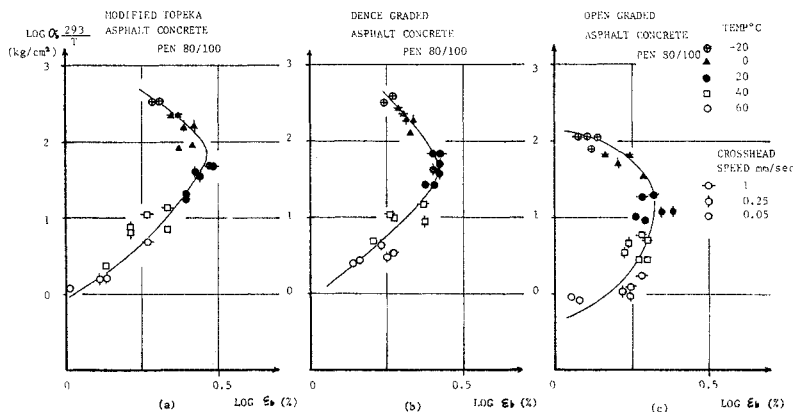


図-4 実用的混合物の破壊包絡線

方向に移動していることが読みとれる。包絡線にはひずみ量が最大となる点が存在し、これより上部ではひずみ速度の増加につれて破壊ひずみ量が減少し、下部では逆の現象が見られる。このことから上下の部分で破壊の形態が異なることが推測される。実験では低温（ひずみ速度大）で脆性破壊が、また高温（ひずみ速度小）では流動的破壊を示し、最大荷重を記録した後もかなり長い間載荷能力を保つことが観察され、このことを裏付けている。

図-4 は修正トベカ、密粒、開粒混合物の破壊包絡線を示す。一連の図は配合によって包絡線のパターンが異なることを示し、混合物は配合によって独自の包絡線を描くことがわかる。

図-5 は 図-3 と同一配合であるがアスファルトの種類を変えた混合物の包絡線を示している。図-5 では 図-3 と違って、低温部分ではばらつきが大きい。Smith は高分子物質でも低温になると結晶化などの物質的変化が生じ、1本の包絡線を形成しない物質があることを報告している⁷⁾。図-5 のアスファルトも同様に、低温でガラス転移などの物質的変化を生じていると解釈もできる。

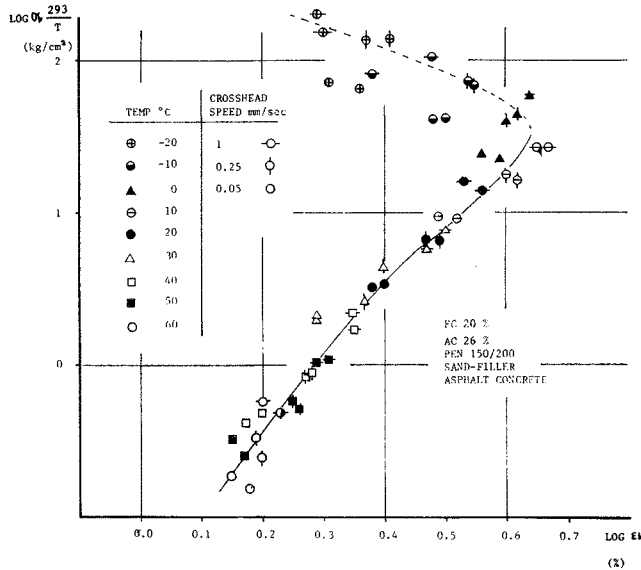
(2) クリープ試験との比較

試験方法に独立という包絡線の性質をアスファルト混合物で確かめるためにクリープ試験を行った。圧縮試験ではクリープによる破壊点は明確に認められないが、本研究ではいわゆる第3期クリープの開始点を破壊とみなした。図-6 は砂アスファルト混合物のクリープ試験の結果を示している。実線は定ひずみ速度試験によって得られた包絡線で、点はクリープ試験から得られた破壊点である。菅原ら⁸⁾の行った曲げ試験のデータを参照すると、クリープと定ひずみ速度試験が同一の“包絡線”を描くことがわかる。よって2つの試験（定ひずみ速度、クリープ）は同一の結果を示すと結論してもそれほど無理ではないと考えられる。

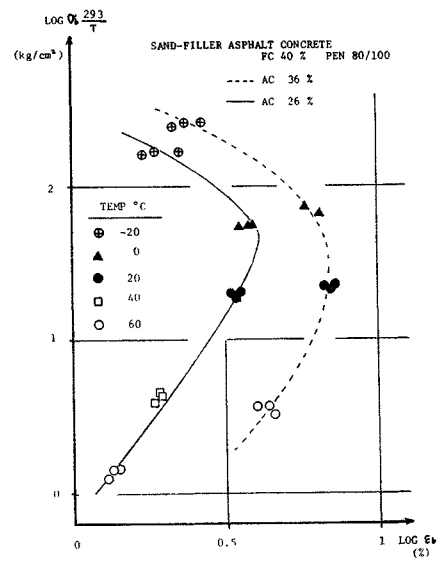
(1), (2) からアスファルト混合物の一軸圧縮特性は試験条件、方法に独立であることが推察され、Smith の理論にほぼ従うことが判明した。

(3) T_0/T の効果

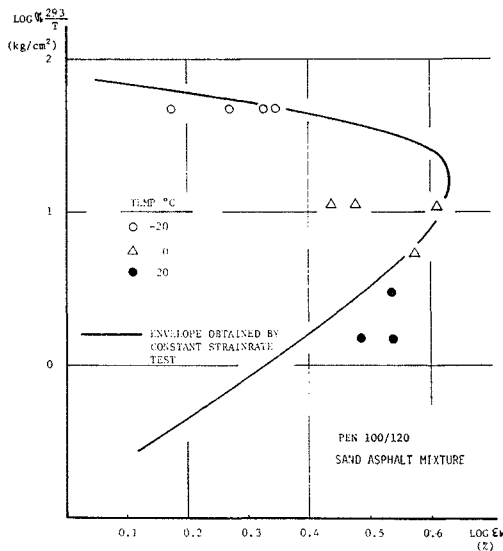
先に述べたが、応力には温度補正がしてある。アスファルト混合物がエントロピー弾性に従うか否かは定かではな



図—5 アスファルトの物質的变化による影響



図—7 アスファルト量の影響



図—6 クリープ試験との比較

いが、本研究では補正をした場合とそうでない場合について検討した。その結果両者には明確な差異は見られなかった。理由として

- ① 試験範囲が比較的狭い(ひずみ速度)
- ② ばらつきが大きい

などがあげられる。しかし本研究では高分子の慣例に従い、補正した包絡線について考察した。どちらがよいかは実験精度の向上、試験範囲の拡大を行えば判明するものと思われる。

5. 混合物の特殊な性質

(1) アスファルト量との関係

図—7 は骨材配合が等しく、アスファルト量の異なる二つの混合物の包絡線を比較したものである。以前から知られていることであるが、アスファルト量の増加は破壊ひずみ量の増大をもたらし、包絡線を右方へ移動させる効果をもつ。包絡線でわかるように、ひずみ量には最大値 ϵ_{bmax} が存在する。いかなる条件の下でもひずみ量が ϵ_{bmax} を越えると破壊を起こすのであるが、アスファルト量と ϵ_{bmax} の関係を 図—8 に示す。

(2) アスファルトの種類による影響

図—9 は4種類のアスファルトを用いた同一配合の砂アスファルト混合物の破壊包絡線を1つの図にプロットしたものである。図からわかるように、アスファルトの種類によって包絡線上をカバーする範囲は違うが、同一の包絡線を形成していることがわかる。本研究では全部で6種類のストレートアスファルトと約10種の配合について検討してみたが同様の結果を得た。この場合アスファルトの種類を変えても同一配合ならば供試体の密度、飽和度、空隙率に有意な差は見られなかった。結局“他の条件が等しいならば、同一配合の混合物はアスファルトの種類に独立な包絡線を描く”という実験的關係が成り立つことが推察できる。他の条件とは、供試体の作成方法、骨材の種類などである。使用したアスファルトは表—2 のように P.I. がそれほど違わないストレート

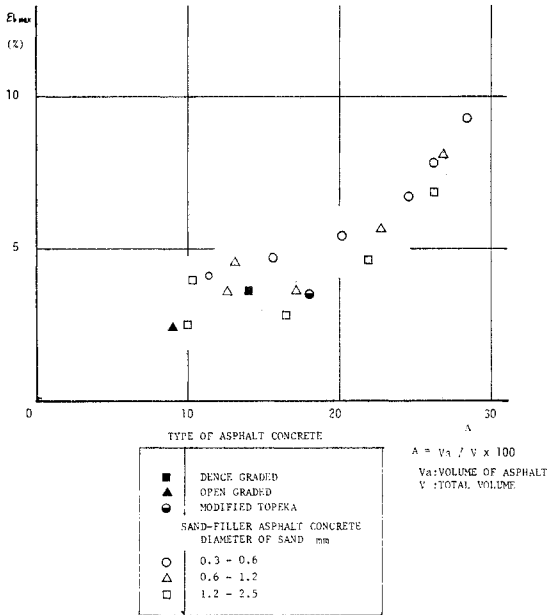


図-8 ϵ_{\max} とアスファルト量の関係

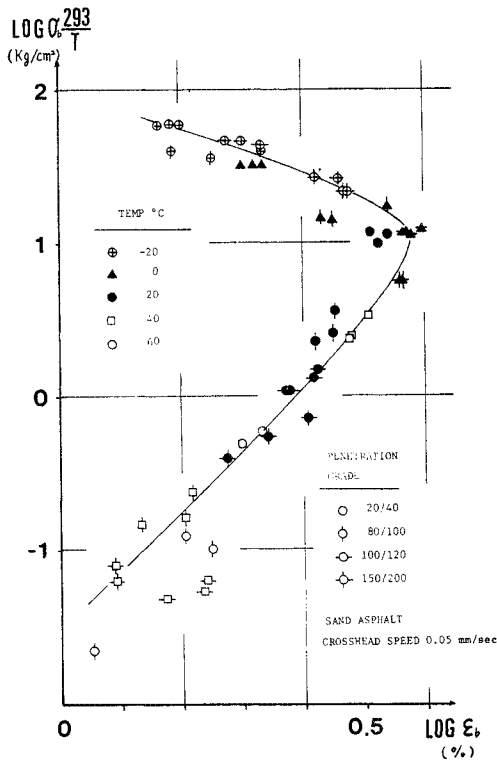


図-9 アスファルトの種類を変えた時の包絡線

アスファルトであるので、この実験的關係が一般的なものであるか否かは断定できない。しかし他のバインダー（タール、ブローンアスファルトなど）でこの關係が成立すれば、混合物からバインダーの影響を消去すること

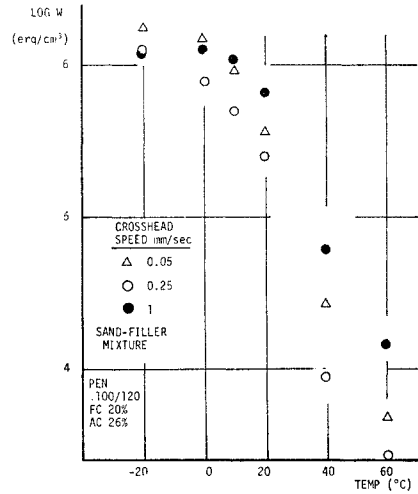


図-10 破壊に要する仕事量

が可能となる。

(3) 破壊に要する仕事量

破壊に要する単位体積当りの仕事量を計算した例を図-10に示す。温度が低下するにつれて一定値に収束する傾向のあることがわかる。破壊に要する仕事量 W は単位体積当り、

$$W = \int_0^{\epsilon_b} \sigma d\epsilon \dots \dots \dots (4)$$

で表わされるが、これを

$$W' = \sigma_b \cdot \epsilon_b / 2 \dots \dots \dots (5)$$

と近似した時の式(4)、(5)の比較例を表-3に示す。表からわかるように試験条件全般にわたり、

$$W' \approx 0.8 W \dots \dots \dots (6)$$

表-3 W と W' の比較 (砂フィラー混合物 Pen 100-120 FC. 20%)

温 度 (°C)	変形速度 (mm/sec)	$W'/W \times 100$ (%)
-20	0.05	81
	0.25	81
	1	83
0	0.05	78
	0.25	76
	1	78
10	0.05	81
	0.25	81
	1	81
20	0.05	81
	0.25	81
	1	83
40	0.05	83
	0.25	83
	1	83
60	0.05	65
	0.25	83
	1	83

という実験的關係が成立している。

式 (5), (6) より

$$W \approx 0.6 \sigma_b \varepsilon_b \dots\dots\dots (7)$$

が成り立つ。

低温では W が大体一定になる実験的傾向が示されたので (4), (7) より

$$\sigma_b \cdot \varepsilon_b = C \quad (C: \text{定数}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore \log \sigma_b = \log C - \log \varepsilon_b \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) は $\log \sigma_b \sim \log \varepsilon_b$ 平面で、傾き -1 の直線を示している。図-3 で低温領域では包絡線は傾き -1 の直線に漸近していることがわかる (図中の点線)。

(4) 破壊包絡線の漸近線

混合物は粘弾性体であり、一定の弾性係数を持たないが、一般に載荷時間の短い所で瞬間弾性を示し、

$$\sigma = E_i \varepsilon \dots\dots\dots (10)$$

と表わされる。ただし E_i は瞬間弾性率 (Instantaneous modulus) である。逆に載荷時間が長い所では粘性抵抗がゼロとなり、平衡弾性を示すと考えられ、

$$\sigma = E_e \varepsilon \dots\dots\dots (11)$$

と表わされる。ただし E_e は平衡弾性率 (Equilibrium modulus) である ($E_i \gg E_e$)。

仮に破壊まで式 (10), (11) が成り立つとすると、

$$\sigma_b = E_i \varepsilon_b \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_b = E_e \varepsilon_b \dots\dots\dots (13)$$

となる。図-11 は式 (12), (13) および (8) で囲まれた包絡線概念図である。本実験では試験条件が限られていたために式 (12), (13) を満たすデータは得られなかったが、他の研究によればごく低温では混合物の強度は逆に小さくなることが報告されている⁹⁾。これは式 (12) を満たしている部分とも考えられる。

6. 破壊時間

破壊までの時間は包絡線のみからは求められないが、

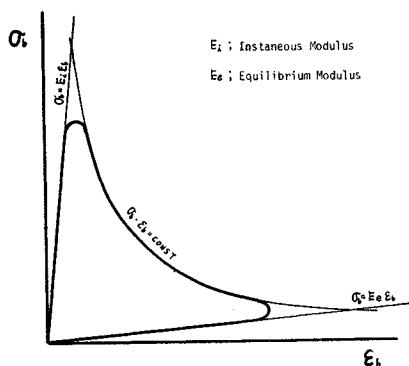


図-11 破壊の基準線

2, 3 の仮定を設けることにより各試験間の破壊時間の関係を求めることができる⁵⁾。

混合物は破壊に至るまで線型粘弾性を示すと仮定する (破壊は通常非線型領域で発生し、この仮定には多少困難があるが)。

緩和弾性率を $E_r(t)$ 、定ひずみ速度試験から得られるスティフネスを $F(t)$ とすると

$$E_r(t) = F(t) \left\{ 1 + \frac{d \log F(t)}{d \log t} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

という関係がある⁵⁾。

またクリープコンプライアンス $D(t)$ と $E_r(t)$ との間には¹⁰⁾

$$sL\{D(t)\} = \frac{1}{sL\{E_r(t)\}} \dots\dots\dots (15)$$

ただし $L\{\}$ はラプラス変換である。

ある時間の範囲でスティフネス $F(t)$ は a, b を定数として、

$$F(t) = at^{-b} \dots\dots\dots (16)$$

と近似すると $D(t)$ は式 (14), (15) より

$$D(t) = \frac{\sin \pi b}{ab\pi(1-b)} t^b \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。

供試体が定ひずみ速度試験で σ_b^* , ε_b^* および破壊時間 t_1 で破壊したと仮定する。一方、応力 σ_b^* のクリープ試験を行ったとすると、包絡線は試験方法に独立であるからひずみ ε_b^* で破壊する。このとき破壊までに至る時間を t_2 とすると、破壊直前では、

$$F(t_1) = \sigma_b^* / \varepsilon_b^* \quad (\text{定速ひずみ試験}) \dots\dots\dots (18)$$

$$D(t_2) = \varepsilon_b^* / \sigma_b^* \quad (\text{クリープ試験}) \dots\dots\dots (19)$$

$$\therefore F(t_1) = 1/D(t_2) \dots\dots\dots (20)$$

式 (20) に、式 (16), (17) を代入すると

$$\log t_2 = \log t_1 + \frac{1}{b} \log \left[\frac{\pi b(1-b)}{\sin \pi b} \right] \dots\dots\dots (21)$$

が得られる。この式は定ひずみ速度試験とクリープ試験での破壊時間の関係を示すものである。

表-4 は修正トベカスファルト混合物のクリープ試験に関して、式 (21) で計算された破壊時間と実験値との比較を示している。実験数が少ないので結論はできないが、オーダー的には合っている。

表-4 破壊時間の計算 (20°C)

応力 (kg/cm ²)	実験値 $\log t$ (sec)	計算値 $\log t$ (sec)
20	1.90	1.73
10	2.41	2.85
5	3.48	3.95

表-5 図-12 で用いられたシフトファクター

温度 (°C)	-20	0	10	20	40	60
$\log aT$	3.9	2.5	1.4	0	-1.3	-2.6

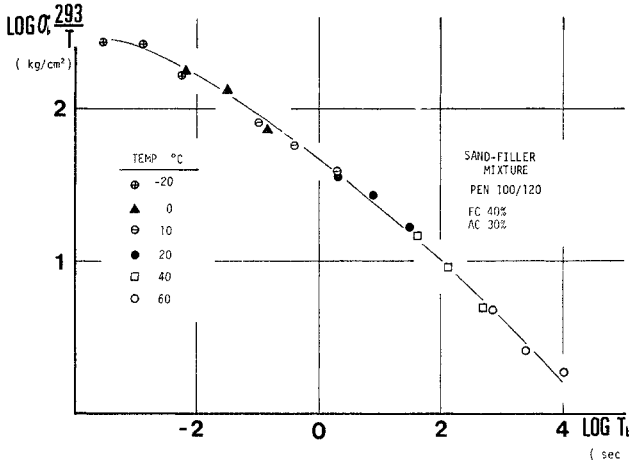


図-12 破壊時間のマスターカーブ

図-12 は混合物がクリープで破壊に至る時間を 20°C の条件に換算した、いわゆるマスターカーブを示している。表-5 に用いたシフトファクターを示す。破壊時間と応力の間に時間温度換算則が適用できるかどうかは別問題であるが、図は応力によって破壊時間を求められることを示している。アスファルト混合物には一定した強度はなく、設計などに用いられる強度の基準もあいまいなものである。しかしごく限られた場合であるが、破壊時間を考えて強度を決定することが提唱される。降伏値が存在しないと仮定すると、混合物はどのような小さな荷重でもクリープ流動を起こし、最終的には破壊する。この意味では、すべての応力レベルが強度であるということもできる。しかし破壊に至る時間が応力によって異なるのである。小さな荷重でも確かに破壊はするがそれに至るまでに膨大な時間がかかるならば、破壊荷重とはいえない。したがって一定応力を受ける構造物（水利構造物、駐車場など）では使用期間内に破壊を生じさせない応力を強度として設計することが提案される。もちろん他の条件（老化など）もあるので、強度をこのように単純に決定することはできない。しかしこの考え方は粘弾性材料の強度決定には有効な方法であると思われる。

7. シフトファクターと包絡線の関係

定ひずみ速度試験によって得られた破壊点 (σ_b, ϵ_b) が包絡線を形成するためには破壊時ひずみ ϵ_b と応力

σ_b が同じ時間-温度依存性を示すことが必要である。同一種類の物質では ϵ_b, σ_b は試験温度 T とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関数であるから

$$\epsilon_b = f(T, \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots(22)$$

$$\sigma_b = g(T, \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots(23)$$

と表わせる。時間-温度換算則が成立すれば、式 (22), (23) はおののシフトファクターを a_T, a_T' として

$$\epsilon_b = f(T_0, \dot{\epsilon} a_T) = F_{T_0}(\dot{\epsilon} a_T) \dots\dots\dots(24)$$

$$\sigma_b = g(T_0, \dot{\epsilon} a_T') = G_{T_0}(\dot{\epsilon} a_T') \dots\dots\dots(25)$$

ただし T_0 は基準温度である。ここで $a_T = a_T'$ であれば式 (24), (25) より $\dot{\epsilon} a_T$ を消去して

$$H(\sigma_b, \epsilon_b) = 0 \dots\dots\dots(26)$$

が導ける。

式 (26) はひずみ速度、温度を含まない関数で、包絡線を表わす式である。図-13 は圧縮強度 σ_b ~ ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ から求めたシフトファクター a_T を用いて破壊ひずみ量 ϵ_b のマスターカーブを描いたものである。表-6 に用いたシフトファクターを示す。 $\epsilon_b \sim \dot{\epsilon}$ でも滑らかな曲線が得られ、双方のシフトファクターが同じであるとしても不合理ではないと考えられる。

表-6 図-13 で用いられたシフトファクター

温度 (°C)	-20	0	10	20	40	60
$\log a_T$	3.6	1.8	1.0	0	-1.9	-3.0

8. 結 論

以下のことが結論される。

(1) アスファルト混合物の一軸圧縮特性に Smith

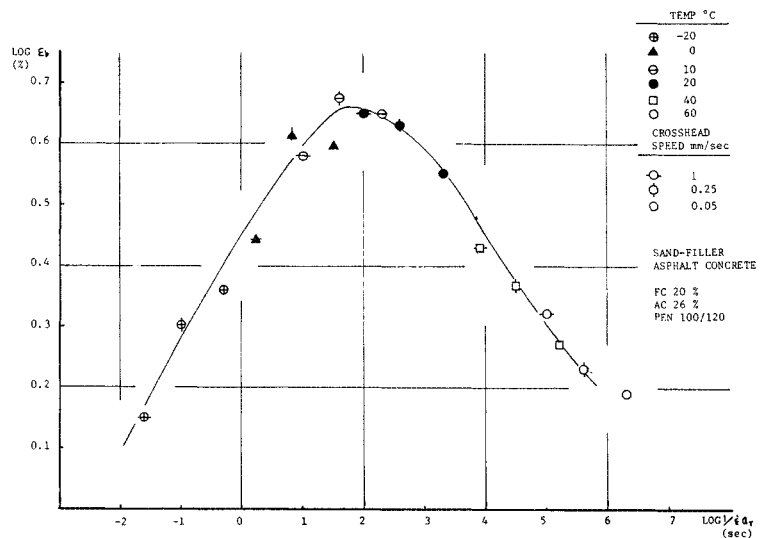


図-13 ϵ_b のマスターカーブ (20°C に換算)

の破壊包絡線理論が適用できると考えられる。

(2) 包絡線は混合物の種類によってユニークな形状をなすと考えられる。

(3) 破壊包絡線は試験条件の影響を消去でき、アスファルト混合物の破壊特性を示す際に有力な手段になると考えられる。

(4) アスファルト混合物は他の土木材料のように一定の強度を期待することは困難であるが、一定荷重を受ける部材がクリープ破壊を生じる場合は破壊までに要する時間を寿命に対して十分余裕のある範囲にとどめるという考え方で破壊強度を求めることが提案される。

9. おわりに

われわれの行った実験は一軸圧縮だけであるが、曲げ、引張といった試験でも包絡線を検討することが必要であり、これからの課題であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 渡辺 隆・渡辺暉彦: 土木学会第 29 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門 (1973).
- 2) Smith T.L.: J. Appl. Phys. 35, p. 27 (1964). ほか多数.
- 3) Smith T.L.: Proc. of the 4th Inter. Congress on Rheology Part 2 (1963).
- 4) たとえば 井本立也: 概説レオロジー, 東京化学同人 (1963).
- 5) Smith T.L.: J. Polymer Science Part A 1, p. 3597 (1963).
- 6) Buche F., Halpin J.C.: J. Appl. Phys. 35, p. 36 (1964).
- 7) Smith, T.L.: J. Appl. Phys. 35, p. 27 (1964).
- 8) 菅原照雄・工藤忠夫: 土木学会論文報告集, 第 201 号, p. 113 (1972).
- 9) 森吉昭博 ほか: 土木学会論文報告集, 第 210 号, p. 57 (1973).
- 10) たとえば Frederick R. Eirich: Rheology II, p. 40 (1958).

(1975.3.20・受付)