

V-17 アスファルト混合物の変形係数のマスターカーブについて

北海道大学工学部 張 肖寧
(中国ハルビン建築工程学院)
北海道大学工学部 正会員 菅原照雄

1. まえがき

アスファルト混合物の力学的性質には、外的要因である温度と載荷速度の他、内的要因として、その材料特性も大きな影響をもたらしている。このため、温度並びに載荷速度の違いによって、アスファルト混合物がどのような応答を示すかを、材料特性ごとに掌握しておくことは、その材料評価を行なううえで有意義な指標となる。また、材料評価を的確に行なうことはアスファルトコンクリート舗装の力学的性状を評価診断するための重要なステップとなる。

本論文では、材料特性のうち、バインダー粘度と骨材粒度を変化させた8種類のアスファルト混合物（以下混合物と言う）について、圧裂法を用いて変形係数を測定した結果を報告する。また、経験法としての時間-温度換算則を利用して、各種材料の変形係数のマスターカーブを求め、マクロな見地から、これら材料の変形性状を考察する。

混合物の変形係数のマスターカーブはある載荷条件下での広範囲な時間（あるいは温度）にわたる材料変形性状を表し、アスファルト舗装の耐久性と安定性（例えば、破壊性状、流動性状、荷重分散性状）にも、顕著な関連性を持っている。

本文では、マスターカーブを四次多項式に近似し、この曲線の示す意味を検討し、各種材料の変形性状における内的要因の究明を試みた。

2. 使用材料と供試体作製

使用したバインダーの物理性状と混合及び転圧の温度条件を表-1に示す。また混合物の粒度組成とバインダー量を表-2に示す。

表-1 バインダーの物理性状

種 類	針入度	軟化点 (°c)	F I .	混合温度 (°c)	転圧温度 (°c)
40-60	56	52.5	-0.5	155.0	144.0
60-80	60	50.6	-0.6	160.0	147.0
80-100	86	47.8	-0.4	152.5	140.5
100-120	108	44.5	-0.7	164.5	150.0
120-150	134	42.8	-0.6	147.0	123.0

試験に供した試料は厚さ6cmのマーシャル供試体（突き固め回数：表裏各50回）である。

3. 試験方法及び試験条件

本試験において行なった圧裂法は、幅と曲率を持たせた載荷板を使用して、マーシャル供試体を直径方向に加圧し、鉛直面に生じる引張応力及び引張りずみを求めるものである。

表-2 混合物の配合とバインダー量

通過百分率%	細粒度 混合物	粗粒度 混合物	アスファルト 安定処理	密粒度 混合物
20-13	0.0	9.5	28.8	0.0
13-10	4.7	8.6	9.6	10.9
10-5	14.1	24.7	24.0	20.2
5-2.5	14.5	19.0	14.4	17.4
2.5-1.2	4.7	8.9	4.8	13.2
1.2-0.6	4.2	8.1	3.8	5.6
0.6-0.3	8.0	5.7	4.0	9.4
細目砂	23.6	5.2	2.4	8.9
ファイラー	21.3	5.2	4.1	8.5
バインダー量	6.3	5.0	4.1	5.8
針 入 度	86	86	86	5種類
骨材体積率	84.96	87.63	90.05	85.84
略 称	S A	S O	A N	M T

載荷装置は、インストロン1350型動的試験装置を用い、縦横方向の変形量の測定には非接触変形計AEC-2525型を用いた。試験条件を表-3に示す。

4. 試験結果

試験結果より、各種類混合物の変形係数についておのおののシフトファクターを求め、時間-温度換算則を利用し、基準温度を 10°C としてマスターカーブを描いた。そのうち、バインダー性状を変化させた5種類の密粒度混合物のマスターカーブとシフトファクターを図1、2に示す。針入度86のバインダーを使用して粒度を変化させた4種類の混合物のマスターカーブとシフトファクターを図3、4に示す。

表-3 試験条件

制御方式	: 荷重制御
荷重波形	: サイン波
試験温度	: -10°C — 40°C
周波数	: 10, 3, 1Hz

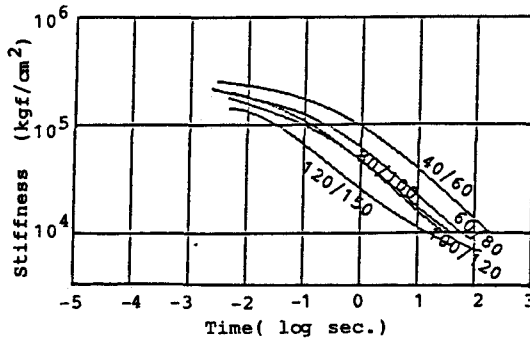


図-1 変形係数のマスターカーブ
(バインダー粘度の影響)

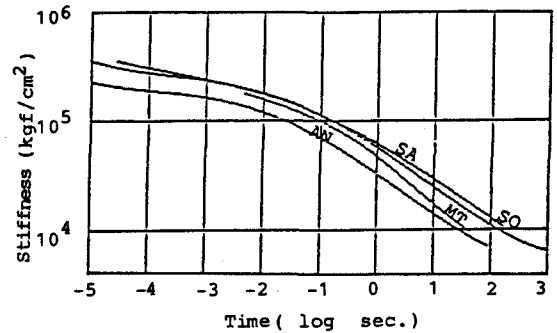


図-3 変形係数のマスターカーブ
(骨材粒度組成の影響)

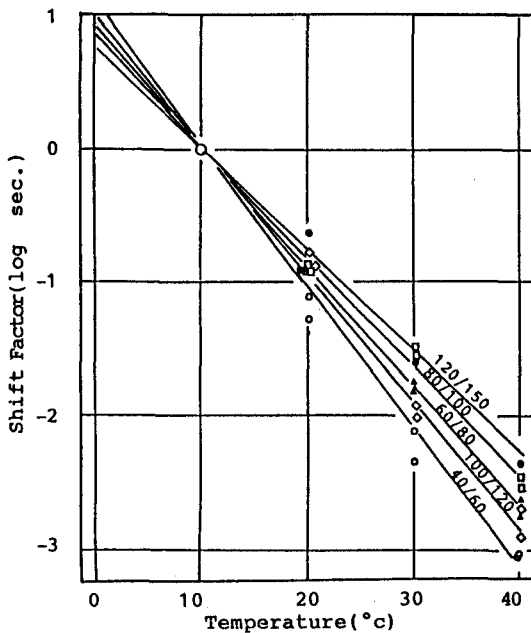


図-2 マスターカーブのシフトファクター
(バインダー粘度の影響)

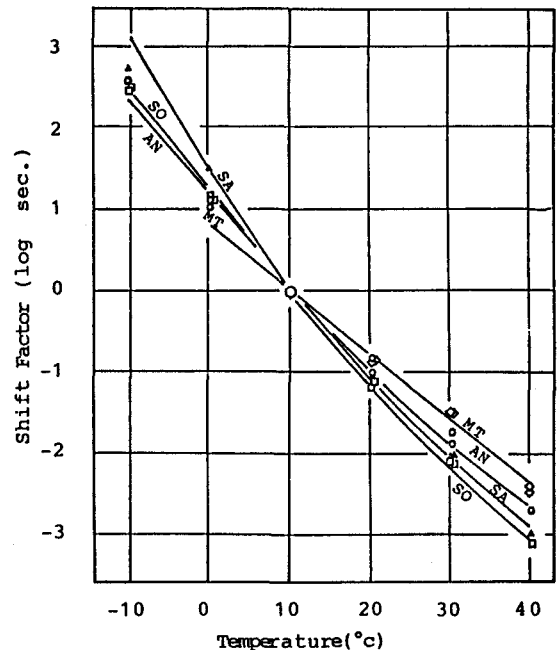
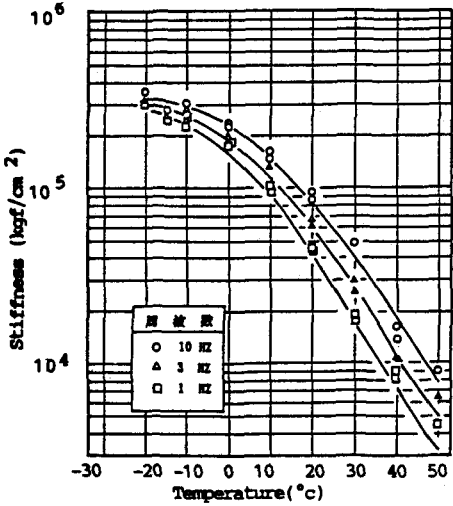
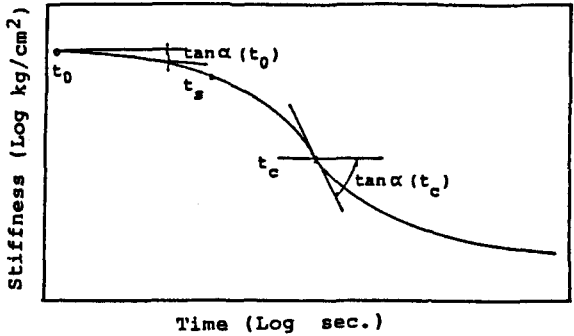


図-4 マスターカーブのシフトファクター
(骨材粒度組成の影響)

参考として、実験の結果得られた混合物の変形係数と時間、温度の関係を、粗粒度混合物の結果を例として図一5に示す。図1、3より、これらの混合物の変形係数は、概して、中間の載荷時間領域で載荷時間依存性が顕著になり、短時間及び長時間領域でこの依存性が小さくなることが分かる。また、時間—温度換算則より、温度依存性にも同じ傾向が存在していると考えられる。



図一5 粗粒度混合物の変形係数と時間、温度の関係



名称	特徴	存在条件
t ₀	接線の傾き tanα 最小	F''(t)=0
t _c	変曲点	F'''(t)=0
t _s	接線の傾きの変化率最大	F''(t)=0

図一6 変形係数マスターカーブの形

5. 変形係数のマスターカーブについて

5-1. 4次多項式による近似

前の結果より、変形係数のマスターカーブは図一6に示されているような形で現われ、このマスターカーブをF(t)と書けば、F(t)には次の性質を示す量（以下示性量と呼ぶことにする）が見られる。

粘弾性論より、F(t)を数学的に解明することはかなり困難であるため、この曲線にあてはまる四次多項式（両対数目盛）：

$$F(t)=\sum_{i=0}^4 a_i (\log_{10} t)^i \dots\dots (1)$$

を利用し、F(t)に近似させることを試みた。

近似計算においては最小二乗回帰法を用い、回帰係数と重相関係数を求めた。その結果を表一4に示す。

表一4より、変形係数のマスターカーブは四次多項式でよく近似されることが分かる。また、時間—温度換算則より、任意温度T(°C)及び任意載荷時間t(sec.)における動的変形係数S(kgf/cm)は次式で示される。

$$\log_{10} S=\sum_{i=0}^4 a_i (\log_{10} t-\log_{10} \alpha_T)^i \dots (2)$$

ここで、
 a_1 : 回帰係数
 $\log_{10} \alpha_T$: シフトファクター

表一4 回帰係数と重相関係数

種類	針入度	相関係数 R	測定点個数 N
密粒度	5 6	0.9989	3 0 点
	6 0	0.9989	3 0 点
	8 6	0.9926	3 0 点
	1 0 8	0.9965	3 0 点
	1 3 4	0.9854	3 0 点
細 粒 度		0.9998	3 6 点
粗 粒 度		0.9959	3 6 点
安定処理		0.9908	3 6 点

5-2. 示性点について

実験の結果得られた混合物の変形状の従来の評価には、マスターカーブ群を利用する方法と示性緩和時間を利用する方法などが考えられるが、材料組成を変化させた混合物の変形状の相対比較を行なう時前者は実用上不便で、後者は極限変形係数の測定が困難である。このため、変形状の時間（あるいは温度）依存性とアスファルト舗装の安定性と耐久性の関連を表すために、有効な指標を確立することが望ましい。

このようなことから、四次多項式での示性点 t_s 、 t_c 、 $\tan\alpha(t_0)$ 、 $\tan\alpha(t_c)$ に、次の概念を考えた。

(1) 最小緩和時間 t_s . 図-6に示されているように、混合物の変形状においては、短時間領域と中間の載荷時間における変形曲線の勾配が明らかに異なり、 $F'''(t)=0$ の条件より、 t_s は短時間領域における混合物の弾性変形状から流動変形状に移行する臨界点となる。 t_s の左側で、材料変形の時間依存性、すなわち応力緩和性がかなり小さくなるので、 t_s を最小緩和時間と呼ぶことにする。

(2) 最小緩和速度 $\tan\alpha(t_0)$. 時間が短くなると共に、変形係数マスターカーブの測定曲線接線のかたむきは0に収れんするが、 $\tan\alpha=0$ の直線が存在する時間領域は測定が困難となっている。このため、工学的手法として、測定時間範囲内の $\tan\alpha$ 最小値を得る時間 t_0 における $\tan\alpha(t_0)$ をこの領域内の滞弾性変形状の代表値とし、それを最小緩和速度と呼ぶことにする。

(3) 最大流動時間 t_c . 中間の載荷時間における混合物の粘弾性流動は無限に続いていかず、骨材の内部摩擦作用より、ある載荷時間で、流動速度が増加する傾向から減少するに移行し、四次回帰式の変曲点 t_c がこの臨界点になると考えられる。 t_c を最大流動時間と呼ぶことにする。

(4) 最大流動速度 $\tan\alpha(t_c)$. (3)に述べたように、最大流動時間 t_c における材料変形曲線の傾きは工学の見地から見れば最大流動速度と考えることができる。この傾きを最大流動速度と呼ぶことにする。

以上のように、ある基準温度 T_0 における4つの示性量を利用して、混合物の変形状を把握できるようになれば、主として経験的手法から発展されたシフトファクターの概念より、任意温度における混合物の変形状も把握されるであろう。また最小緩和速度と最大流動速度の二つの示性量は温度を変化させても変わらないので、実用上に興味ある示唆を与えるものと思われる。

表-5 近似曲線の示性量

種類	針入度	最小緩和時間 $t_s(\text{sec.})$	最大流動時間 $t_c(\text{sec.})$	最小緩和速度 $\tan\alpha(t_0)$	最大流動速度 $\tan\alpha(t_c)$	$t_c - t_s$ (sec.)
密粒度	5 6	-0.37	1.67	-0.08	-0.48	1.99
	6 0	-0.54	0.98	-0.12	-0.47	1.52
	8 6	-0.59	0.82	-0.16	-0.43	1.41
	1 0 8	-0.79	0.61	-0.17	-0.48	1.40
	1 3 4	-1.73	0.56	-0.02	-0.42	1.23
細 粒 度		-0.52	2.40	-0.07	-0.44	2.92
粗 粒 度		-1.33	0.96	-0.07	-0.37	2.29
安定処理		-1.71	0.52	-0.06	-0.37	2.23

5-3. 変形状の評価

表-2に示された8種類材料について、前述した4つの示性量を求めその結果を表-5に示す。参考とし

て、温度ごとに材料の最小緩和時間と最大流動時間を図-7、8に示す。図-7、8を描くためには、材料の変形係数のシフトファクターの概念が利用されている。表-5と図-7、8より、次のことが明らかになった。

(1) バインダー粘度の影響

表-5に示されたように、バインダー粘度は明らかに材料変形状に影響を及ぼす。アスファルトの針

入度を粘性性状を表すパラメーターとして見ると、示性量との関連性は次の通りである。

図一7より、10℃において針入度値の大きいものは最小緩和時間と最大流動時間が共に小さくなる傾向が見られる。シフトファクターの勾配が変化していることに従って、10℃より低い温度領域における最小緩和時間 t_s の粘度依存性が若干著しくなり、高い温度領域で最大流動時間 t_c の粘度依存性が小さくなっている。

0℃の場合、針入度が56から134まで変化すると、最小緩和時間はほぼ1.5けた変動する。すなわち、針入度134のバインダーを使用した混合物は0.10秒から緩和変形状を表し、針入度が56の場合には4秒まで殆ど緩和変形状を表さないことが分かる。同様に、40℃の場合、針入度56の混合物が約0.06秒で最大流動速度を得たが、針入度134の場合は既に約0.002秒で最大流動速度に達することが分かる。

また、載荷時間を0.1秒と仮定すると、針入度56から134までの領域にわたって、同じ示性時間を取るためには、ほぼ15℃の温度差が生じる。

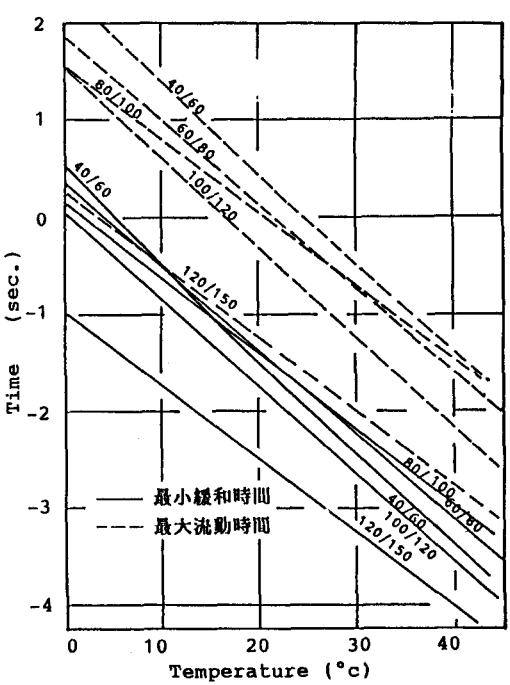
最小緩和時間 t_s から最大流動時間 t_c までは、混合物が粘弾性流動性状を表し、この時間領域の範囲 $t_c - t_s$ は混合物の変形状を評価する時重要なパラメーターと考えられる。表一4に示されたように、針入度の値が大きくなると共に、 $t_c - t_s$ も短くなる。

また、表一4より、 $\tan\alpha(t_c)$ はバインダー粘度においてはあまり変化しないことも分かる。骨材粒度組成を変化させた3種類材料の最大流動速度と比較すると、最大流動速度に対しては、バインダー粘度より骨材粒度の方が影響が大きい。

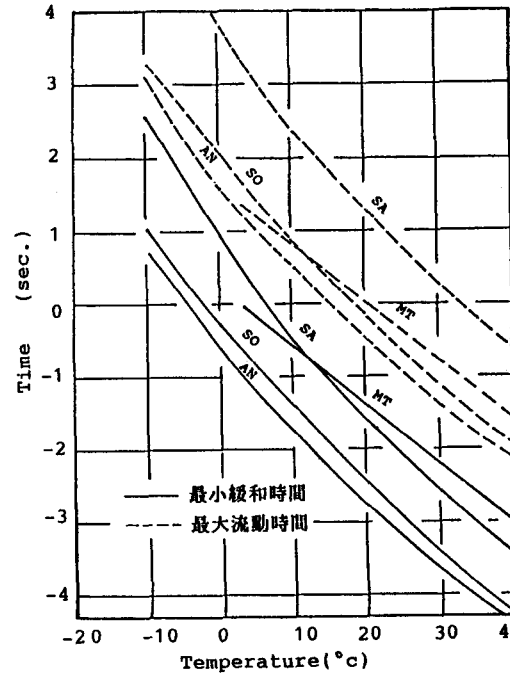
(2) 骨材粒度組成の影響

従来、骨材粒度組成を評価するためには骨材体積率 C_V が用いられ、本文に使用された4種類混合物の C_V は表一2に示されている。表一5と図一8に示されるように、 C_V は混合物の変形状に大きな影響を及ぼし、 C_V が大きくなると共に、混合物の最小緩和時間と最大流動時間が短くなり、最大流動速度が小さくなる。

0℃の場合、細粒度アスコンと安定処理材料の最小緩和時間の差はほぼ2けたほどと見られ、40℃における最大流動時間もほぼ1けた以上に見られた。0.1秒の載荷時間を仮定すると、同じ示性量を取るため15℃



図一7 変形係数の示性時間
(バインダー粘度の影響)



図一8 変形係数の示性時間
(骨材粒度組成の影響)

近くの温度差が見られた。

6. 結論

圧裂法にて動的載荷試験を行ない、混合物の変形性状に及ぼすバインダー粘度と骨材粒度組成の影響を調べた結果明らかになったことがらをまとめると以下のようである。

(1) 圧裂法にて動的載荷試験を行ない測定された変形係数より、時間温度換算則を利用して得られたある基準温度におけるマスターカーブは、四次多項式で精度よく近似することができる。

(2) 四次多項式で近似される変形係数のマスターカーブには4つの示性量が存在しており、この示性量より、混合物の変形性状を評価することができる。

(3) 混合物の変形性状にはバインダー粘度及び骨材粒度組成の影響が著しく、それらは変形係数のマスターカーブの四つの示性量とかなりの相関性が見られた。

(4) 今回測定された材料組成の範囲内では、骨材粒度組成の変形性状への影響はバインダー粘度より著しい。

参考文献

- 1) 菅原照雄：アスファルト混合物の物性，土木学会論文集，第346号/V-1 1984年8月
- 2) 山田裕之：圧裂法によるアスファルト混合物の力学性状測定法に関する研究，昭和59年度北海道大学修士論文
- 3) 間山正一・菅原照雄：エポキシアスファルト混合物の応力緩和性状について，土木学会論文報告集 第250号 1976年6月
- 4) 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 1976年10月