

経年劣化によるアスファルトの性状変化と アスファルト混合物の疲労特性に関する研究

前原弘宣¹・高橋 修²・芥川直人³

¹非会員 東亜道路工業株式会社（〒300-2622 茨城県つくば市要 315-126）

²正会員 博（工）長岡技術科学大学（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

³非会員 大成ロテック株式会社（〒104-0031 東京都中央区京橋 3 丁目 13 番 1 号）

アスファルト混合物の疲労特性は、使用するアスファルトの種類やアスファルトの経年劣化の程度に依存している。本研究では、アスファルト混合物の疲労特性の変化はバインダとして用いているアスファルトの性状によって把握することが可能であると考え、アスファルトの性状とアスファルト混合物の疲労特性の関連性について検討を行った。その結果、繰返し曲げ試験から得られるアスファルト混合物の疲労特性と使用したアスファルトの粘弾性パラメータの間に高い相関があることを確認し、疲労特性と粘弾性パラメータの対応関係について考察を行った。

Key Words : aging, polymer modified Asphalt, fatigue life ,viscoelasticity

1. はじめに

アスファルト混合物層の耐流動性の向上を目的として開発されたポリマー改質アスファルトは、わだち掘れが生じやすい重交通路線の表層を中心に広く使用されている。このように供用条件の厳しい箇所に適用され、長期の供用に耐えるためには、わだち掘れに対する抵抗性に見合った疲労破壊抵抗性が要求される。しかしながら、ポリマー改質アスファルトが用いられるような重交通路線では、深刻なわだち掘れが生じる前に舗装表面からひび割れが生じ補修を行う事例が散見される。これらのことから、表層材料の疲労特性を把握することは舗装の設計や維持修繕を行う上で非常に重要であると考えられる。

筆者らはポリマー改質アスファルトを用いたアスファルト混合物の劣化の影響を考慮した疲労特性を、ストレートアスファルト（ストアス）を用いた場合と比較し検討した¹⁾。アスファルトの各種物性とアスファルト混合物の疲労特性には高い関連性があることを定性的に確認したが、両者を関連付ける具体的な物性を見だし、それらの間に明確な相関性を評価するには至らなかった。

本研究は、アスファルト混合物の疲労特性とアスファルトの物性との関連性について、劣化の程度とアスファルトの種類に注目して再度検討を加えたものである。本研究の目的は、アスファルトの物性とアスファルト混合物の疲労特性の関連について整理し、アスファルトの種類や劣化の程度が異なっても、統一的に両者の関連

を把握することができる指標を見出すことである。以降、アスファルト混合物を単に混合物と記す。

2. 検討の概要

本研究で行った検討のフローを図-1 に示し、各過程の概要を以下に示す。

(1) 使用材料および促進劣化方法

本研究では、表層に一般的に用いられる最大粒径が13mmの密粒度アスファルト混合物を用いて各種の検討を行った。使用材料はそれぞれの規格を満足したものをを用い、配合はマーシャル設計法により決定した。本研究で用いた骨材は先の検討¹⁾で使用したものと産地は同じであるが、生産ロットが異なることによる粒度の差異が認められたため再度配合設計を行った。本研究で用いた混合物の合成粒度を図-2 に示す。配合設計の結果、アスファルト量は5.4%とした。新たに配合設計を行った混合物に対し促進劣化試験を行ったところ、劣化傾向が先の検討¹⁾と若干異なっていたため、本研究では先の検討¹⁾の試験結果は用いず全ての試験を新たに行った。

アスファルトには、一般的なストアス 60/80、ポリマー改質Ⅱ型（改質Ⅱ型）、ポリマー改質Ⅲ型（改質Ⅲ型）を使用した。使用したアスファルトの主要な物性を表-1 に示す。アスファルトの物性試験は、促進劣化させた混合物から舗装調査・試験法便覧²⁾「G029 アスファルトの

回収試験方法」に準じて抽出したものを用いた。一般に改質アスファルトはその性状を変化させずに回収することは困難といわれているが、先の検討¹⁾で回収により物性はほとんど変化しないことを確認しており、本研究でもそれを前提とした。

混合物の促進劣化は、ローラコンパクタで締め固めた混合物を 120℃に保った恒温空気槽内に一定期間放置する方法により行った。放置期間は 2 日、4 日、8 日、12 日の 4 水準とし、促進劣化を施していないものを含め 5 水準について以降に示す各種試験を実施した。促進劣化方法等の詳細については先の報告¹⁾を参照されたい。

(2) アスファルト混合物の疲労試験

アスファルト混合物の疲労試験は舗装調査・試験法便覧の「B018T アスファルト混合物の曲げ疲労試験方法」に示されている 4 点曲げ試験装置を用いひずみ制御で行った。疲労試験用供試体はローラコンパクタを用いて締め固めた 400×300×40 の供試体から、400×40×40 の寸法で 5 本切り出したものを用いた。供試体長手方向は 2 面しかカットしていないが、これは促進劣化により最も劣化が進行していると考えられる面を切り取らないためである。また、改質Ⅲ型で促進劣化期間が 8 および 12 日の条件では、通常破壊点とする応力の変曲点が明確でなかったため、試験開始直後に応力が安定したときの値に対して半分になった時点を破壊と定義した。疲労試験は-10℃、0℃、15℃で行い、ひずみは 400×10^{-6} とした。このひずみはこれまでの試験結果から、使用する全てのアスファルト混合物で、疲労試験が現実的な期間内（最長 7 日間程度）で終了するように設定したものである。

試験結果として、疲労破壊回数を求めるに加え、応力とひずみの時系列データから複素弾性率 G^* やその位相差 δ 等を求め、これらについても整理した。

(3) アスファルトの物性試験

アスファルトの物性はダイナミック・シア・レオメータ（以降 DSR）試験から得られる各種指標を用いることとしたが、既往の研究成果との比較等を行うため、一般的に行われる各種物性試験も併せて実施した。

物性試験として、針入度試験、軟化点試験、伸度試験を行ったが、これらは全て JIS K 2207 に準拠し実施した。

DSR 試験は、試験温度を固定し载荷速度を変化させる周波数スイープ試験と、载荷速度を固定し温度を変化させる温度スイープ試験を行った。周波数スイープ試験では、試験温度を疲労試験と同じく -10℃、0℃、15℃とし、温度スイープ試験では载荷速度を 10 rad/s（1.59Hz）とした。温度や周波数を変化させる範囲は試験装置の設定範囲内で可能な限り広くとり、全てのアスファルトの共通範囲は-20～80℃、0.1～600 rad/s とした。両方の試験に共

通の試験条件を表-2 に示す。表-2 に示したように基本的にプレートは平行プレートのφ8mmを用いたが、温度スイープ試験で30℃以上の温度条件では25mmの平行プレートを用いた。

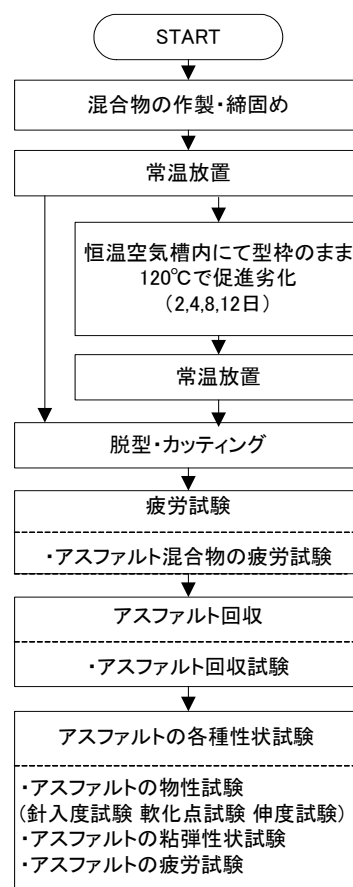


図-1 研究内容のフロー

表-1 使用したアスファルトの一般的な物性

		ストアス 60/80	改質Ⅱ型	改質Ⅲ型
針入度 (25℃)	1/10 mm	64	46	55
軟化点	℃	46.0	60.0	84.0
伸度 (15℃)	cm	100+	93	98
タフネス (25℃)	N・m	—	26.3	30.5
テナシティ (25℃)	N・m	—	19.1	25

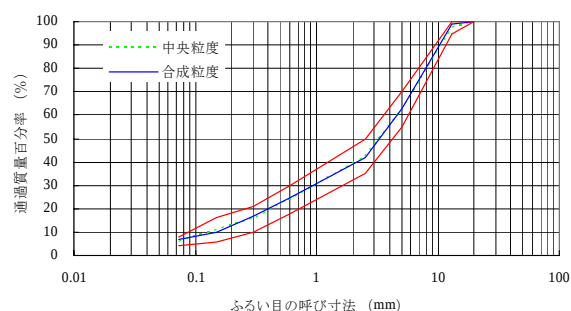


図-2 本研究で用いたアスファルト混合物の合成粒度

表-2 DSR の試験条件

項 目	設 定 値
制御方式	ひずみ制御
プレート	平行プレート ϕ 8mm (25mm)
プレート間隔	1mm
ひずみ	0.5%

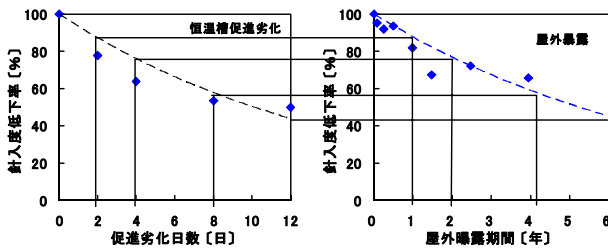


図-3 促進劣化と屋外暴露の針入度低下率

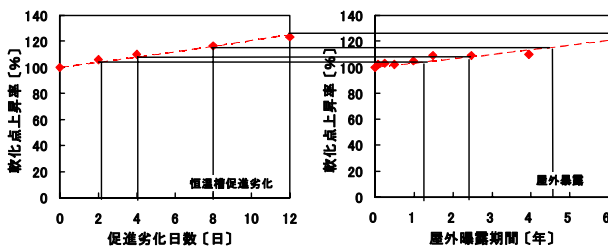


図-4 促進劣化と屋外暴露の軟化点上昇率

(4) アスファルトの疲労試験

近年、欧米諸国ではアスファルトのパフォーマンスを評価する試験として DSR を用いたアスファルトの疲労試験が注目されており、多くの研究成果が発表されている^{3)~6)}。この試験は、DSR のタイムスイープ機能を用いてアスファルトにひずみや応力振幅を一定の周期で与え続けるというもので、時間の経過と共にアスファルトの粘弾性状は変化し最終的には破断に至るという現象に着目したものである。試験条件は、文献等により様々であり、使用する DSR 試験機の性能によって試験条件が制限される。このため、本研究で用いた全てのアスファルトに対し同一の条件で試験ができるよう、予備的な検討を行い統一的な試験条件を決定した。

アスファルト供試体をセットするプレートおよびプレート間隔は表-2 に示した試験条件と同じであるが、試験は応力制御で行った。これは改質アスファルトをひずみ制御で試験を行っても、応力が徐々に低下するのみで明確な破壊点が現れないためである。

応力制御試験の応力は、事前に求めておいたひずみと応力の関係から初期ひずみが 5% となるように与え、この応力を供試体が破壊するまでかけ続けた。

3. アスファルトの物性試験の結果

混合物から抽出したアスファルトから、促進劣化によるアスファルトの性状の変化を把握し、既往の研究と比

較することで、促進劣化したアスファルトが何年の供用と同程度の劣化状態であるか検討を行った。

(1) 屋外暴露試験結果との比較

屋外暴露した密粒度アスファルト混合物の供試体から抽出したアスファルトに対し各種の物性試験を行っている和田の研究⁷⁾と本研究で促進劣化したアスファルトの物性との比較を行った。和田の研究でもストアス 60/80 を使用しているが、本研究と初期の物性が異なるため、試験結果は初期の物性値を基準とした 100 分率で表した。本研究の促進劣化と暴露年数を針入度低下率で比較したものを図-3 に、軟化点上昇率で比較したものを図-4 に示す。両者の針入度低下率を比較すると、4 日の促進劣化が 2 年程度の暴露に、8 日の促進劣化が 4 年程度の暴露に、12 日の促進劣化が 6 年程度の暴露に相当していた。軟化点上昇率による比較でも、各劣化日数と暴露年数の関係は針入度で比較したものと同じ傾向であった。

(2) 促進劣化の程度と各種物性の関係

アスファルトを促進劣化させる方法には各種のものがあるが、Superpave で採用されている促進劣化方法は、我が国のアスファルト混合物においてもその劣化状態をよく再現し、促進劣化後の性状は 5 年程度の供用に相当することが報告されている⁸⁾。Superpave の促進劣化方法は、回転式薄膜加熱試験 (RTFOT) を行った後、加圧劣化試験 (PAV) を行うもので、RTFOT は混合物製造に伴う加熱による劣化を、PAV は長期供用による劣化をそれぞれ再現している。これらの試験方法は、舗装調査・試験法便覧の規定に準拠して行い、PAV の試験温度は 100℃ とした。ストアスの促進劣化による針入度ならびに軟化点の変化を図-5 に示す。図中の「未混合」は混合していないアスファルト、「未劣化」は促進劣化を行っていないもので、以降も同様に用いる。

Superpave の促進劣化では、RTFOT 後の針入度は 43、軟化点は 51、PAV 後の針入度は 27、軟化点は 57 となった。未劣化のものと RTFOT 後の値に差があるが、これは RTFOT が混合物製造から運搬・敷均しまでの劣化を再現しているのに対し、本研究では加熱混合後直ちに締固めを行っているためであると考えられる。PAV を行った後の劣化状態と本研究の劣化状態を比較すると、針入度および軟化点共に 8 日ないしは 12 日と同程度となった。

これらのアスファルトの粘弾性状を DSR で測定した結果の例を図-6 に示す。DSR 試験は粘弾性状に関する各種の指標が得られるが、ここではストアスの複素弾性率 G^* の温度による変化を示した。指標の詳細については後述するが、RTFOT 後と未劣化ならびに PAV 後と 8 日劣化は温度の変化に対して殆ど同じ推移を示している。改質アスファルトの場合の温度変化に伴う G^* の推移も、ス

トアスと同様によく一致していた。また、これらのアスファルトで G^* 以外の粘弾性指標もよい一致を示していたことから、本研究の促進劣化方法は、物性的に実際の供用による劣化をよく再現しているといえる。

4. アスファルト混合物の疲労試験の結果

ストアスおよび改質Ⅱ型を用いた混合物の疲労試験結果を図-7 および図-8 に、試験温度 15℃における改質Ⅲ型を用いた混合物を含めた全てのアスファルト混合物の疲労試験結果を図-9 に示す。

アスファルトの種類毎に平均的な破壊回数を比較すると、ストアスよりも改質Ⅱ型を用いた混合物が、改質Ⅱ型よりも改質Ⅲ型を用いた混合物の破壊回数が大きくなっている。一方、促進劣化に伴う破壊回数の変化に着目すると、ストアスおよび改質Ⅱ型を用いた混合物の 15℃ および 0℃では、促進劣化日数が長くなるに従い破壊回数がほぼ一様に減少する傾向を示すのに対し、-10℃では一部例外があるが促進劣化日数が長くなるに従い一旦破壊回数が減少し再び増加するという傾向を示す。また、改質Ⅲ型を用いた混合物の温度 15℃では、破壊回数は促進劣化日数が長くなるに従い一旦増加し 8 日から再び減少するという傾向を示す。

これらを先の検討¹⁾の結果と比較すると、アスファルトの種類が異なる混合物が示す平均的な破壊回数の傾向は一致していた。しかし、促進劣化に伴う破壊回数の変化を比較すると、先の検討では上記の改質Ⅲを用いた混合物の 15℃における試験結果と同様な傾向が改質Ⅱ型を用いた混合物の 15℃でも現れていたが、本研究の改質Ⅱ型を用いた混合物では、0℃の試験結果に同様な傾向が認められるものの、15℃では促進劣化日数が長くなるに従いほぼ一様に破壊回数が減少するなど、異なった傾向を示している。

アスファルト混合物の粘弾性状や疲労特性は、その粒度に大きく影響されることが知られているが⁹⁾、本研究でも新たに配合設計を行った混合物と以前の混合物では、その粒度に顕著な差はないにもかかわらず促進劣化によりアスファルトの性状が変化したことに伴う疲労特性の発現のしかたが異なるなど、粒度の差異が混合物の疲労特性に大きな影響を与えることが確認された。

5. アスファルト混合物の粘弾性状

(1) 粘弾性状の評価パラメータ

アスファルト混合物の疲労特性は混合物の粘弾性状と関連が深く、疲労試験の繰返し载荷における応力とひずみの関係から計算される散逸エネルギーと混合物の疲労特性の間には強い相関があることが知られている⁹⁾。

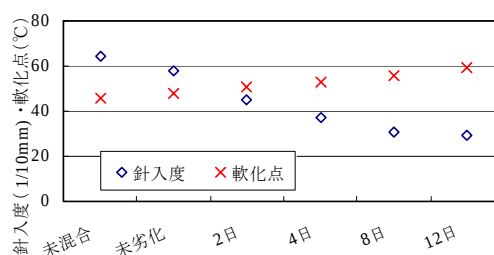


図-5 針入度および軟化点による比較

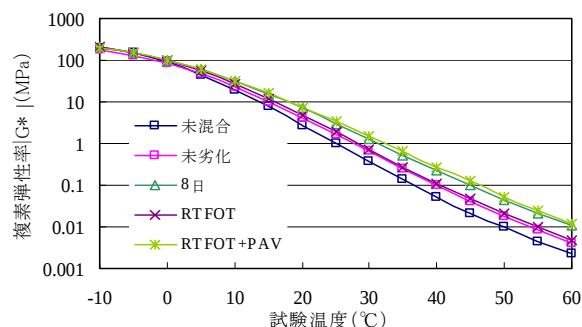


図-6 促進劣化による複素弾性率 G^* の変化

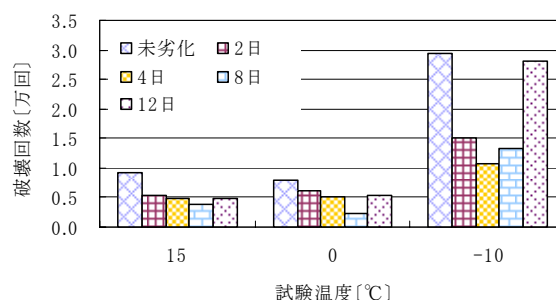


図-7 ストアスを用いた混合物の疲労試験結果

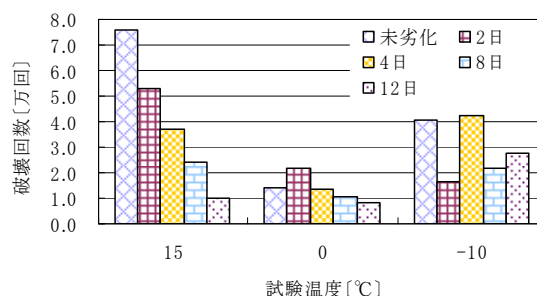


図-8 改質Ⅱ型を用いた混合物の疲労試験結果

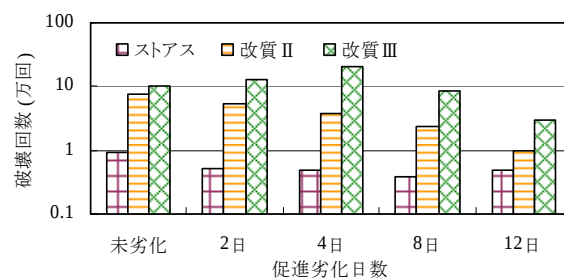


図-9 全ての混合物の 15℃における疲労試験結果

疲労試験時の応力とひずみの関係例を図-10 に示す。応力とひずみは一定の位相差を持って連続的に変化するが、散逸エネルギー W は応力およびひずみの最大値を用いて(1)式で定義される。

$$W = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin \delta \quad (1)$$

ここに、 σ_0 ：応力の最大値 ε_0 ：ひずみの最大値
 δ ：応力とひずみの位相差

図-11 はストアスを用いた混合物の疲労試験で、1000 回載荷時の応力とひずみの時系列データを、縦軸に応力横軸にひずみを取ってプロットしたもので促進劣化に伴う変化も同時に示している。1 回の載荷による散逸エネルギーはこの楕円の面積に相当する。

既往の研究⁹⁾では破壊時の散逸エネルギーと破壊回数に強い相関が認められ、アスファルトの種類によらず両者の関係は両対数紙上で一本の直線で表すことができるとしている。本研究でも同様な整理を試みたが、劣化が進行した混合物の破壊時の応力とひずみの関係は図-11 のような楕円にならず散逸エネルギーを求めることができないものがあつた。そこで、応力とひずみの波形が安定している 1000 回載荷時のものから散逸エネルギーを求めた。破壊時の散逸エネルギーが求められないものを除き破壊時と 1000 回時の散逸エネルギーを比較すると、その決定係数は 0.94 になることから、1000 回時の散逸エネルギーと破壊回数にも相関があると考えた。

散逸エネルギーは $G^* = \sigma_0 / \varepsilon_0$ で定義される複素弾性率を用いて式 (2) のように書き換えることができる。

$$W = \pi \cdot \varepsilon_0^2 \cdot (G^* \sin \delta) \quad (2)$$

式中の $G^* \sin \delta$ は一般に損失弾性率と呼ばれるもので、Superpave でもアスファルトの粘弾性状を評価する一指標となっている。本研究では疲労試験をひずみ一定で行っているため、 $W \propto G^* \sin \delta$ となることから、以降は散逸エネルギーの代わりに $G^* \sin \delta$ を用いる。

本研究ではアスファルトの粘弾性の指標としても $G^* \sin \delta$ を用いるため、以降は混合物の疲労試験から求めた散逸エネルギーを $G_m^* \sin \delta$ 、アスファルトの DSR 試験から求めた散逸エネルギーを $G_b^* \sin \delta$ と記す。

(2) アスファルト混合物の粘弾性状とアスファルト混合物の疲労特性の関連

試験温度 15°C における破壊回数と $G_m^* \sin \delta$ の関係を図-12 に示す。図中では各混合物について $G_m^* \sin \delta$ と破壊回数の関係をプロットしているが、促進劣化日数をマーカーを変えて示した。アスファルトの種類は、使用するアスファルト毎にデータの分布範囲が異なるため、各

混合物に対するデータ群を円で囲み区別できるようにした。また、アスファルトの種類による破壊回数と $G_m^* \sin \delta$ の関係を把握しやすくするため、未劣化のものと 12 日劣化のものについて、同じ劣化日数のものを結ぶ回帰線を示した。

回帰線を示した未劣化のものは改質アスファルトを用いた混合物のように破壊回数が大きいものほど $G_m^* \sin \delta$ が小さくなる傾向を示している。これは、既往の研究⁹⁾で示されている $G_m^* \sin \delta$ が小さいものほど疲労特性が優れるという知見と一致する。一方、同じアスファルトを用いた混合物の劣化に伴う $G_m^* \sin \delta$ と破壊回数の関係に着目すると、破壊回数が小さいものほど $G_m^* \sin \delta$ も小さくなっている。未劣化のものと 12 日劣化のものに対して示した回帰線が全く一致していないことから明らかなように、混合物の劣化に伴う疲労特性の変化は「アスファルト混合物の疲労破壊特性はアスファルトのコンシステンシーには独立でほぼ骨材粒度で決まる」という既往の研究⁹⁾で示された知見とは矛盾する結果となった。改質Ⅲ型を用いた混合物では、15°C 以外の $G_m^* \sin \delta$ は算定していないが、ストアスや改質Ⅱ型を用いた混合物の 0°C や -10°C で行った結果でも $G_m^* \sin \delta$ と破壊回数の関係は概ね同様な傾向を示した。ただし、-10°C では G^* や δ の劣化に伴う変化が非常に小さいことから、 $G_m^* \sin \delta$ と破

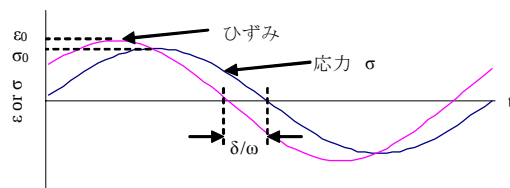


図-10 疲労試験における応力とひずみの関係

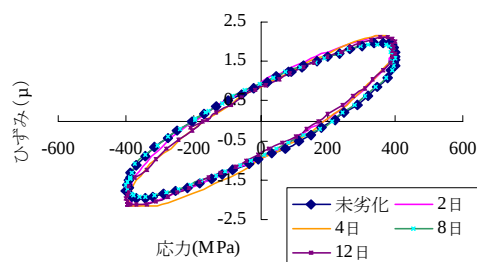


図-11 ストアスの応力とひずみのループ (1000 回)

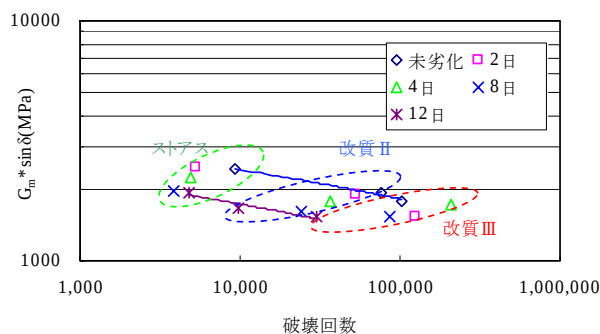


図-12 15°Cにおける破壊回数と $G_m^* \sin \delta$ の関係

壊回数との関係は 15℃や 0℃と比較し明確ではなかった。

既往の研究と異なる結果が得られた原因を明らかにするため、促進劣化に伴う混合物の各種性状の変化について整理を行った。

促進劣化に伴う混合物の特徴的な変化として、ストアスを用いた混合物では劣化した供試体の体積が増加する傾向を示すことが挙げられる。ストアスの疲労試験用供試体の密度測定結果より求めた空隙率は劣化期間の長いものほど増加する傾向を示し、未劣化と 12 日劣化の混合物の空隙率は 0.5%程度の差があった。一方、改質アスファルトを用いた混合物では促進劣化に伴う供試体厚さや空隙率の変化は認められなかった。

ストアスを用いた混合物だけに空隙率の変化が生じた原因として、ストアスは改質アスファルトと比較して促進劣化に伴う成分の変化が大きいことが挙げられるが¹⁾、データが不足しており十分な検証を行うに至っていない。

既往の研究では⁹⁾、アスファルト混合物の種類が異なる場合やアスファルト混合物の種類は同じであってもアスファルト量が最適アスファルト量より少ない場合は、 $G_m \sin \delta$ と破壊回数の関係は異なるものになることが確認されている。空隙率の増加はアスファルト量が少ない場合に相当すると考えることができる。しかし、促進劣化を行うと破壊回数が小さいものほど $G_m \sin \delta$ が小さくなる傾向は全ての混合物に共通しており、改質アスファルトを用いた混合物では促進劣化に伴う空隙率の変化は確認できないことなどから、空隙率の変化のみに既往の研究で示されている傾向と矛盾する結果が得られた原因を求めることはできない。

次に、評価指標とした $G_m \sin \delta$ は複素弾性率 G^* と位相角 δ を変数としている点に着目した検証結果を示す。未劣化のストアスを用いた混合物に対し、試験条件を変化させて疲労試験を行い得られる G^* と δ の関係を図-13に示す。試験条件は、試験温度を 15℃および 20℃とし、载荷周波数は 0.1Hz～10Hz、ひずみは $200 \sim 400 \times 10^{-6}$ で変化させた。試験温度や载荷条件が異なると G^* と δ は個々に変化するが、両者の関係はほぼ一本の曲線で表されている。同図中には促進劣化に伴う G^* と δ の関係もプロットしているが、これらは上記の試験条件の変化に伴

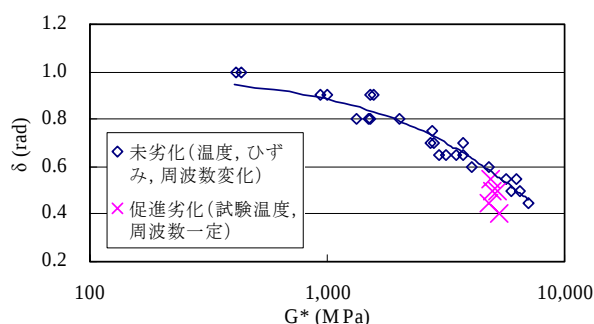


図-13 G^* と δ の関係 (ストアス)

う G^* と δ の関係とは全く異なった傾向を示している。

このような傾向の差は、試験条件の変化に伴う G^* と δ の変化と比較し、促進劣化を行った場合は δ の変化に対して G^* の変化が相対的に小さいため生じている。

改質アスファルトを用いた混合物では、促進劣化を行った場合の G^* の変化量は改質Ⅱ型が 500MPa、改質Ⅲ型が 800MPa であり、ストアスを用いた混合物の 450MPa と顕著な差はなく、 δ の変化範囲も同様であった。改質アスファルトを用いた混合物については未劣化の混合物に対して試験条件を変化させるなどしたデータ収集を行っていないが、未劣化の混合物の G^* や δ の応答がストアスと極端に異なるとは考えられず、上記のように促進劣化を行った場合の G^* の変化の範囲はストアスと同様に小さいことを考慮すると、促進劣化を行った場合の $G_m \sin \delta$ と破壊回数の関係が既往の研究と異なる傾向を示した主たる原因は、促進劣化の有無により G^* と δ の変化の傾向が異なるためであると推測することができる。これ以上の考察は本章のデータのみではできないため、次章のデータと併せて次章以降で行う。

疲労試験から算出した $G_m \sin \delta$ は既往の研究でアスファルトのコンシステンシーによらず混合物の疲労特性を説明できる指標となることが確認されているため、促進劣化による疲労特性の変化を含めて混合物の疲労特性を統一的に説明することができる指標となることが期待された。しかし、破壊回数と $G_m \sin \delta$ の関係は、疲労破壊抵抗性が異なる混合物に対して示す傾向と促進劣化に伴い示す傾向が異なっており、促進劣化による疲労特性の変化を含めた統一的な関係を見出すことができなかった。

6. アスファルトの粘弾性状

(1) アスファルトの劣化に伴う粘弾性状の変化

アスファルトの促進劣化に伴う粘弾性状の変化について整理する。ストアスで载荷速度を 10 rad/s とし、温度を変化させた場合の $G_b \sin \delta$ を図-14に示す。0℃以上のデータの分布が確認できる領域では劣化日数が大きいものほど $G_b \sin \delta$ は大きくなる傾向を示している。温度を変化させた場合の基本的な傾向は全てのアスファルトで同じであった。

次に試験温度が 0℃で、载荷速度を変化させた場合のストアスの $G_b \sin \delta$ を図-15に、改質Ⅱ型の $G_b \sin \delta$ を図-16に示す。ストアスでは各劣化日数の曲線は载荷速度により複雑に交差し、载荷速度が 10 rad/s 以上では劣化が進行したものほど $G_b \sin \delta$ が小さくなる傾向を示す。一方、改質Ⅱ型では、劣化が進行したものほど $G_b \sin \delta$ が大きくなる傾向を示し、曲線の交差もあまり見られない。このように、低温ではアスファルトの種類により劣化日数と $G_b \sin \delta$ の関係が異なる傾向を示す。

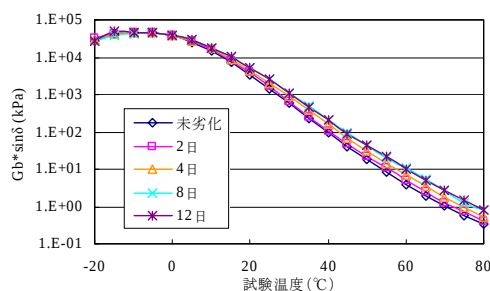


図-14 劣化に伴う $G_b \cdot \sin \delta$ の変化 (ストアス : 10 rad/s)

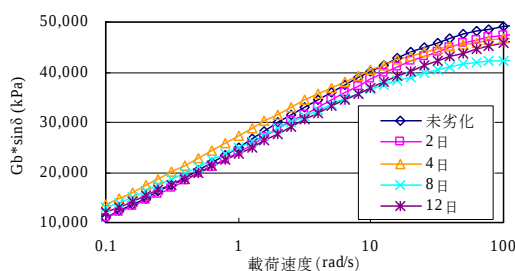


図-15 劣化に伴う $G_b \cdot \sin \delta$ の変化 (ストアス : 0°C)

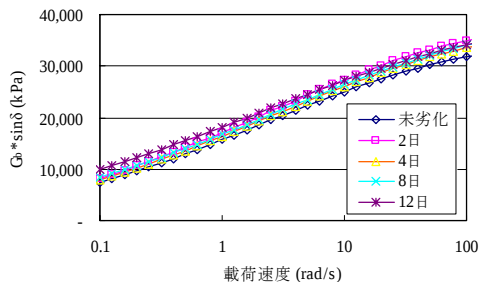


図-16 劣化に伴う $G_b \cdot \sin \delta$ の変化 (改質Ⅱ型 : 0°C)

(2) アスファルトの粘弾性状とアスファルト混合物の疲労特性の関連

アスファルトの粘弾性状と混合物の疲労試験結果の比較を行い、両者の関連性について検討する。

DSR 試験の条件は多岐にわたるため混合物の疲労試験と同じ温度のデータを比較し、大略的な傾向を把握した上で温度や载荷速度をシフトさせたデータと比較を行った。これらの検討から粘弾性状の評価パラメータは最も相関が高いと考えられる $G_b \cdot \sin \delta$ を選定した。

ストアスおよび改質Ⅱ型の $G_b \cdot \sin \delta$ と破壊回数の比較を図-17 および図-18 に示す。横軸は混合物の破壊回数、縦軸は载荷速度が 10 rad/s のときの $G_b \cdot \sin \delta$ である。図中では試験温度が異なるデータ群を丸で囲み区別できるようにした。ストアスの-10°Cおよび0°Cでは劣化に伴うデータの分布はおおよそ正の傾きとなっているのに対し、15°Cでは負の傾きになっている。一方、改質Ⅱ型では全ての温度で負の傾きとなっている。また、0°Cおよび-10°Cの $G_b \cdot \sin \delta$ の分布傾向を試験温度毎に見較べると、その値が分布する範囲が異なるなど統一した傾向は見られない。これらは、図-15 および図-16 に示したように低温で

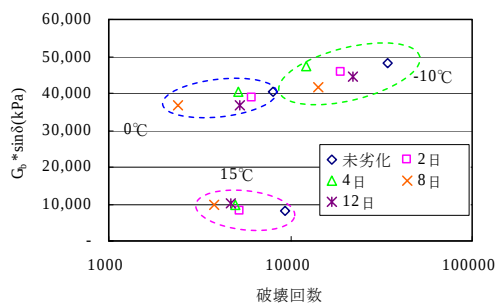


図-17 ストアスの破壊回数と $G_b \cdot \sin \delta$ の関係

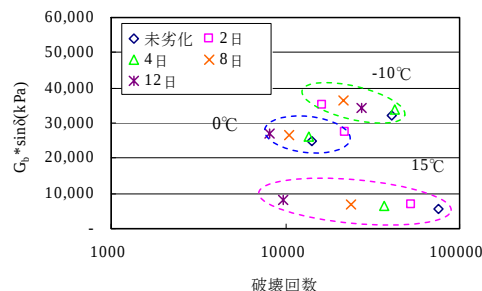


図-18 改質Ⅱ型の破壊回数と $G_b \cdot \sin \delta$ の関係

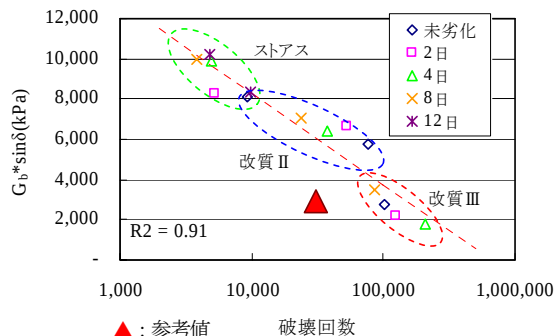


図-19 15°Cにおける破壊回数と $G_b \cdot \sin \delta$ の関係

は劣化に伴う $G_b \cdot \sin \delta$ の変化が複雑であると共に、アスファルトの種類により劣化日数と $G_b \cdot \sin \delta$ の関係が異なる傾向を示すためと考えられる。

図-19 に改質Ⅲ型のデータを加えた 15°C の破壊回数と $G_b \cdot \sin \delta$ の関係を示す。図中のプロットで赤く塗りつぶしたものは改質Ⅲ型の 12 日間促進劣化したものであるが、抽出後のアスファルト表面にワックス状の析出物が観察されたため、抽出過程に異常があった可能性が高いと判断し参考値とした。図-19 の破壊回数と $G_b \cdot \sin \delta$ との間にはアスファルトの種類により若干の偏差があるものの、劣化の程度によらない一義的な関係が認められる。参考値とした改質Ⅲ型のデータを除けば、その決定係数は 0.91 となる。

この関係は疲労試験および DSR 試験を本論文で示した条件で実施し、試験温度 15°C のもの同士を見較べた場合にのみ得られたもので、疲労試験のひずみなどの試験条件を変化させた場合については確認を行っていない。

前章の図-13 と同様に、ストアスの G^* および δ の関係を図-20 に示す。これは、温度を変化させて行った DSR

試験から得られたものであるが、劣化程度によらず全てのデータが1本の曲線上に分布している。図-13に示し促進劣化を行っていない混合物の G^* と δ の関係と同様であることからこの両者の間には一定の対応関係があると考えられ、この対応関係より $G_b^* \sin \delta$ と破壊回数との一義的な関係が得られたと考えることができる。

しかし、図-13では未劣化のものと促進劣化を行ったものでは G^* と δ との関係が異なる傾向を示していることから、単にこの両者の対応関係から $G_b^* \sin \delta$ と破壊回数との間に促進劣化を行ったものを含めた一義的な関係が得られたとするのは明らかに矛盾である。

現段階ではこの矛盾について具体的に考察するためのデータは得られていないが、混合物から得られる G^* と δ との関係が未劣化のものと促進劣化したもので異なる傾向を示したことがアスファルトの $G_b^* \sin \delta$ と破壊回数との関連を考察しにくくしているといえる。この原因として促進劣化によって混合物にアスファルトのコンシステンシー以外の変化が生じたことが考えられるが、この変化について分析を進め、さらにアスファルトおよび混合物の G^* と δ との対応関係について検討を加えることで、アスファルトの $G_b^* \sin \delta$ と混合物の疲労特性の間に普遍的な関係が見出せるのではないかと考えられた。

7. アスファルトの疲労試験

アスファルトの疲労試験は、アスファルトに振動するせん断ひずみを与え続けるとアスファルトは破壊することを再現しており、混合物の疲労破壊を考える上で非常に興味深い試験である。写真-1は試験直後の破断面を撮影したもので、外周部を中心に微細なクラックが発生しアスファルトが破断しているのが確認される。

未劣化の各種アスファルトに対して行ったアスファルトの疲労試験結果を図-21に示す。これらは試験温度20℃、載荷周波数10Hzで行ったものである。図中では G^* が急激に変化する変曲点をマーカーを変えて示しているが、混合物の疲労試験結果と同様にこの変曲点を破壊点と定義すると、ストアスよりも改質Ⅱ型が、さらに改質Ⅲ型のほうが破壊回数は大きくなった。

劣化程度の異なるストアスの疲労試験結果と15℃で実施したストアスを用いた混合物の疲労試験結果の関係を図-22に示す。図中では異なるアスファルトの未劣化のものを結ぶ回帰線を示し、アスファルトの種類はそのデータの分布範囲を円で囲い示した。未劣化のものは正の傾きをもって示された回帰線上に分布しているが、促進劣化したものはこの回帰線を中心に広い範囲に分布し、一定の傾向を見出すことは困難である。

データの蓄積が十分ではないため上記のような結果となった原因について十分な検証を行うことはできないが、

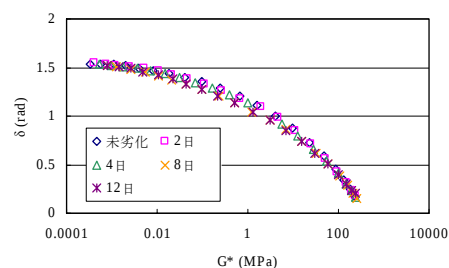


図-20 ストアスの G^* と δ の関係 (10rad/s)

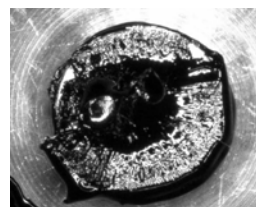


写真-1 アスファルトの疲労破壊状況

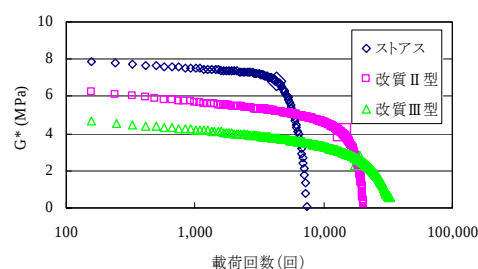


図-21 性質の異なるアスファルトの疲労試験結果 (20℃)

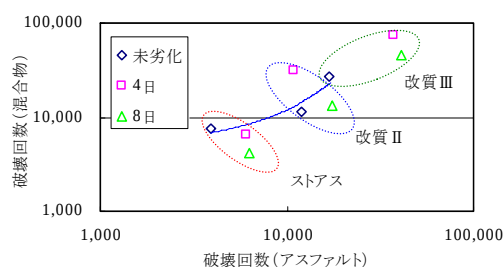


図-22 劣化程度の異なるアスファルトの疲労試験結果 (20℃)

その一因として、混合物中でアスファルトが受けるひずみは混合物が受けるひずみの最大100倍にもなるといわれていることから¹⁰⁾、本研究では応力とひずみの関係が完全に非線形になるような通常よりも大きなひずみ領域で試験を行ったことが挙げられる。アスファルトの疲労試験はひずみやプレート間隔等の試験条件によりその結果が大きく異なることが知られていることから⁴⁾、試験条件を再度見直すと共に、比較するアスファルト混合物の疲労試験の試験条件などについても検討を行い、改めて両者の関係について検討したい。

8. まとめ

本研究で得られた知見を以下にとりまとめる。

- (a) 本研究の促進劣化方法は、既往の研究に示された屋外暴露試験結果と比較すると、恒温空気槽内で120℃、

12 日の促進劣化を行った場合に受けた劣化は 6 年間の暴露に相当していた。また、Superpave の促進劣化との比較から、実際の供用による劣化をよく再現していることがわかった。

- (b) アスファルト混合物の疲労試験時の応力とひずみの関係から算出される $G_m \cdot \sin \delta$ と混合物の疲労特性の関係は、性質の異なるアスファルトを用いた混合物を比較した場合、疲労特性が優れた混合物ほど $G_m \cdot \sin \delta$ が小さくなり、同一のアスファルトを用いた混合物で劣化程度の異なるものを比較した場合劣化が進行し疲労特性が低下した混合物ほど $G_m \cdot \sin \delta$ が小さくなった。これは促進劣化した混合物の G^* と δ との関係が未劣化のものと異なる傾向を示すためである。この原因として、促進劣化によりアスファルトが劣化したことによるコンシステンシー変化以外の要因で混合物の性状が変化したことが考えられた。
- (c) アスファルトの DSR 試験より求めた $G_b \cdot \sin \delta$ と混合物の疲労試験結果とを比較したところ、両者の関係はアスファルトの種類や劣化の程度によらず一義的に表された。ただし、この関係は 15°C という限定的な条件でしか確認することができなかった。
- (d) DSR を用いたアスファルトの疲労試験を行い、混合物の疲労試験結果との比較を試みたが、データが広い範囲に分布し、劣化の影響も一定の傾向をもって表れないため、両者の間に明確な相関性を見出すことはできなかった。本研究では 5% という大きなひずみを与えて試験を行ったが、このような試験条件を改めて検討する必要があると考えられた。

本研究では、混合物の疲労特性と $G_b \cdot \sin \delta$ の間にアスファルトの種類や劣化の程度によらない一義的な関係があることを見出した。これは、15°C という限定的な条件でしか成立しないが、この関係はアスファルトおよび混合物の G^* と δ の関係が共に類似する 1 本の曲線で表され、この両者の対応関係により得られると考えた。しかし、混合物の G^* と δ との関係は促進劣化の有無により異

なる傾向を示すことから、一義的な関係がこの対応関係により得られるとすることはできない。これらのことから、疲労特性を説明することができより普遍的な指標を見出すためには、促進劣化の有無による G^* と δ との傾向の差が生じた要因について検証を進めるとともに、ひずみなどの条件を変化させて疲労試験を行い、より多様なデータの比較を行っていく必要があると考えられた。

参考文献

- 1) 前原弘宣, 高橋 修, 大久保美里: ポリマー改質アスファルトを用いた混合物の劣化および疲労特性, 土木学会舗装工学論文集, 第 11 巻, pp.163-170, 2006.
- 2) 社団法人 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 2007.
- 3) Bocci M., Cardone F., Cerni G. and Santagata E.: Rheological Characterization of the Fatigue Resistance of Asphalt Binders, *International Conference on Asphalt Pavement*, 2006.
- 4) Hilde Soenen, Bernard Eckmann: Fatigue Testing of Bituminous Binders with a Dynamic Shear Rheometer, *2nd Eurasphlt & Eurobitume*, pp.827-834, 2000.
- 5) H. Soenen, C. De La Roche, P. Redelius: Predict Mix Fatigue Tests from Binder Fatigue Properties, Measured with DSR, *3rd Eurasphlt & Eurobitume*, pp.1924-1934, 2004.
- 6) Rodrigo Delgadillo, Hussain Bahia: Rational Fatigue Limits For Asphalt Binders Derived From Pavement Analysis, *AAPT, Vol.74*, pp.97-136, 2005.
- 7) 和田広海: 再生アスファルト混合物の長期供用性に関する研究, 長岡技術科学大学修士論文, 2004.
- 8) 遠西智次, 新田弘之, 坂本浩行, 片脇清: アスファルトバインダの促進劣化試験に関する研究, 舗装, No.30, Vol.6, pp.3-7, 1995.
- 9) 姫野賢治, 渡辺 隆, 丸山暉彦: アスファルト混合物の拡張された疲労破壊規準に関する研究, 土木学会論文集, No.378, V-6, pp.259-268, 1987.
- 10) Hussain U.Bahia, Huachun Zhai, Karen Bonnetti Sadi Kose: Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binder, *AAPT, Vol.68*, pp.1-134, 1999.

AGING CHARACTERISTICS OF ASPHALT BINDERS AND THOSE INFLUENCES ON FATIGUE LIFE OF THE ASPHALT MIXTURES

Hironobu MAEHARA, Osamu TAKAHASHI and Naoto AKUTAGAWA

Fatigue characteristics of hot mix asphalt (HMA) mixtures are influenced from the kind of asphalt binder and aging effects on the fields. It is understandable that the fatigue characteristics of HMA mixtures can be evaluated from physical properties of the asphalt binders. The study investigates a correlation between viscoelastic property of asphalt binders and the fatigue life of the HMA mixtures. Based on the results, this study finds the appropriate viscoelastic parameter and testing conditions, and confirms that the parameter has a high correlation with the fatigue life.