

1. はじめに

わが国では循環型社会の実現を目指して、資材のリサイクルが推進されている。建設分野では天然資材の使用量が膨大であり、自然環境や地域社会に与える影響が大きいことから、リサイクル材料の積極的な活用が重要な技術課題に設定されてきた。その結果、建設材料のリサイクル率は年々増加しており、特にアスファルト発生材については多数の地域で既に90%を超えている。ただし、アスファルト塊を破碎して、再度同じ用途であるアスファルト混合物として活用する、本来の意味でのリサイクルの比率は30~40%程度である。

東京国際空港では旧ターミナル地区の滑走路やエプロンの解体に伴って不要となる舗装材量が大量に発生することから、これらを有効利用して、再生アスファルトコンクリートを使用したフルデプス舗装により新しい滑走路と誘導路を建設した。これほどの大規模プロジェクトではないにしても、国内外における空港需要の拡大傾向に基づくならば、中小規模の補修工事や拡張工事が今後頻出するものと予想される。

アスファルト発生材を再生アスファルトコンクリートとして積極的に活用しようとする、必然的に発生材の混入率を高く設定せざるを得ないが、そのような場合、再生用添加剤を用いて旧アスファルトの機能を回復させることになる。再生用添加剤の品質については、プラント再生舗装技術指針¹⁾に標準的なものが示されている。しかし、項目が多くない等、十分な規定ではないと考えられることから、再生アスファルトの品質を新規アスファルトと同程度にできるとの観点からの品質規定が必要と考えられる。

再生アスファルトコンクリートにおけるアスファルト発生材の混入率が高くなるに従って、必然的に再生用添加剤の添加量も多くなることから、再生アスファルトコンクリートの性状や全体費用に占める再生用添加剤の影響は今後ますます大きくなるものと予想される。しかし、現状では、再生用添加剤とそれを使用した再生アスファルトコンクリートの性状の関係について、再生用添加剤の成分に着目して客観的に評価した事例はあまり多くはない。したがって、今後再生アスファルトコンクリートを積極的に活用していくためには、再生用添加剤の成分と再生アスファルトの物理特性および再生アスファルトコンクリートの性状の関係について検討する必要があると考えられる。

本研究は、再生用添加剤の成分の違いによる再生アスファルトの性状の差違、ならびに再生アスファルトコンクリートの配合と性状の差異について検討したものであ

る。

再生用添加剤を混入することにより調整した再生アスファルトの性状については、上記のプラント再生舗装技術指針やJISにより規定されている一般的な項目のものに加えて、SHRPで採用されている新しいものについても検討した。この場合、アスファルトコンクリート製造時ならびに供用開始後の劣化（老化）をも考慮して、性能評価を行った。

再生アスファルトコンクリートの配合設計においては、再生用添加剤の添加量はプラント再生舗装技術指針の方法で決定し、マーシャル安定度試験に対する基準値は空港土木工事共通仕様書に基づくものとした。再生アスファルトコンクリートの性状は、曲げ試験ならびに繰返し曲げ試験による特性値によって評価した。実際の舗装では長期供用に伴う老化によって混合物の性状が変化することから、老化による性状変化の違いについても着目して再生アスファルトコンクリートの性状を評価した。

2. 試験計画

2.1 基本方針

解体工事等により不要となったアスファルトコンクリート（旧アスファルトコンクリートと称す）を再利用する場合、その中に含まれているアスファルトは老化していることから、再生用添加剤を使用して品質を改善する必要がある。この場合、再生されたアスファルトはその品質が新規アスファルトのものと同程度となるようにすることが基本的な考え方である。これは、旧アスファルトコンクリートが、品質良好に再生できれば構造設計上新規材料のみを用いたアスファルトコンクリート（新規アスファルトコンクリートと称す）と構造的に等価値であるとみなせると考えられているからである。

再生用添加剤の品質としてはプラント再生舗装技術指針に標準的なものが示されている。しかし、これは必要とされる各種特性の限界値を規定していると考えられ、示されている特性値の項目の数も少ない。現に、市販されている再生用添加剤もアスファルト系、石油潤滑油系、動植物油系、アスファルト乳剤系のもものがあって、いずれもその標準的な品質規格を満足しているが、それらの成分は一様ではない。したがって、再生アスファルトコンクリートの性状は、施工直後はともかく、供用後は用いられた再生用添加剤によって大きく異なると考えられる。

空港舗装はその幅員が大きいことから、交通荷重が実際に作用する範囲は広いとはいえず、表層に用いられる

アスファルトコンクリートは自然環境下において老化しやすく、一部では老化の進行速度も大きいと考えられる。そのため、再生アスファルトあるいは再生アスファルトコンクリートの性状、特に老化作用を受けた後のものについて検証する必要がある。

このようなことを背景にして、再生用添加剤の成分による再生アスファルトならびに再生アスファルトコンクリートの性状の違いについて検討した。

再生アスファルトの性状については、針入度試験、軟化点試験、伸度試験、赤外線分析試験、粘度試験、ダイナミックシエアラレオメータ(DSR)試験、ベンディングビームレオメータ(BBR)試験により検討した。ここでは、再生アスファルトコンクリート製造時における劣化、供用中の劣化を想定して、それぞれ回転式薄膜加熱(RTFO)試験ならびに加圧劣化容器を用いた舗装用バインダの促進劣化(加圧劣化, PAV)試験を実施した。なお、アスファルトならびに再生用添加剤の成分を分析する方法としてカラムクロマトグラフィー法(石油学会法)を用いた。そのため、成分はアスファルテン、飽和分、芳香族分、レジン分の割合として表現される。

再生アスファルトコンクリートについては、空港舗装の表層として用いることを前提にしたことから、その配合を空港土木工事共通仕様書(以下共通仕様書)²⁾を満足するように設計した。具体的には、骨材粒度は基本施設の表層タイプI、骨材最大粒径13mmとし、マーシャル安定度試験に対する基準値は大型航空機を設計荷重とする基本施設①表層のものを適用した。

再生アスファルトコンクリートの力学的性状は、曲げ試験ならびに繰返し曲げ試験により評価した。ここでは、長期供用に伴う老化による性状変化の違いについて、促進老化作用を与えた試料を用いた試験を実施することによって評価した。

なお、再生用添加剤の添加量決定方法ならびに再生骨材の品質基準は、プラント再生舗装技術指針のものに準拠した。また、再生アスファルトコンクリートにおける再生骨材の混入率は、共通仕様書に基づいて40%と設定した。

2.2 試験方法

(1) 再生アスファルト

再生アスファルトの性状に関する試験方法である、針入度試験、軟化点試験、伸度試験、粘度試験はJIS K 2207に準拠して実施した。このほかの試験方法は、舗装試験法便覧³⁾あるいは同別冊⁴⁾に示されている方法を用いた。以下では、これらについて概要を示す。

a) 赤外線分析試験

この試験では、4,000~400cm⁻¹の波長領域が測定可能な赤外線分光光度計を用いて、赤外線吸収スペクトルを測定した。ここでは、溶媒として四塩化炭素を用い、アスファルト溶液の濃度を5%とし、アスファルトが酸化することによって表れるC=Oのカルボニル基の吸収程度を1,700cm⁻¹における透過率の大小により定量的に評価した。

b) DSR試験

DSR試験は、二枚の平行な円盤の間に試料を挟み、一定周波数でねじり力を繰返し作用させたときに発生するトルクを測定することにより、アスファルトの動的粘弾性特性を評価する試験である。試料ならびに試験用治具の概要を図-1に示す。また、具体的な試験条件は表-1に示すとおりである。

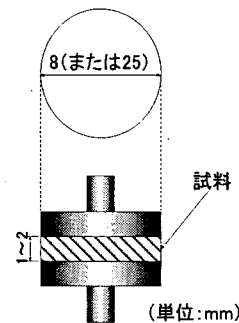


図-1 試料ならびに試験用治具

表-1 DSR試験の条件

項目	条件
試料直径 (mm)	25 (未劣化, RTFO後) 8 (RTFO+PAV後)
試料厚 (mm)	1, 2
角速度 (rad/s)	10
試験温度 (°C)	40 - 70 (未劣化, RTFO後) 19 - 40 (RTFO+PAV後)

この試験により、応力(σ)、ひずみ(γ)ならびにそれらの位相差(δ)が得られ、次のような特性値によって材料特性が評価される。

① 複素弾性率

複素弾性率(G^*)は、次式で定義され、材料の変形抵抗性を表すと考えられる。

$$|G^*| = \sigma_0 / \gamma_0 \quad (1)$$

ここに、

σ_0 : 最大応力、

γ_0 : 最大ひずみ、

② 損失正接

損失正接は $\tan\delta$ で計算され、材料の粘性的または弾性的傾向の度合いを表す。ちなみに、位相差は定全弾性体、定全粘性体のそれぞれで 0° 、 90° となる。

c) BBR試験

BBR試験は、低温時のアスファルトの静的粘弾性特性を測定するものである。この試験では、図-2に示すように、ビーム状のアスファルト供試体を用いて一定荷重1Nによる3点曲げ試験を実施し、荷重時間(t)とともに増加するたわみ(δ)により変化するスティフネス(S_t)を求める。このほか、 $\log S_t$ と $\log \delta_t$ の傾きである m を求める。 S_t は発生応力の大小を、 m は応力緩和性状を表すと考えられており、 S_t が小さく、 m が大きいほど、低温時にはひび割れが生じにくいとされる。試験条件は表-2に示すとおりである。荷重時間は240秒であるが、以下では60秒におけるデータを使用している。

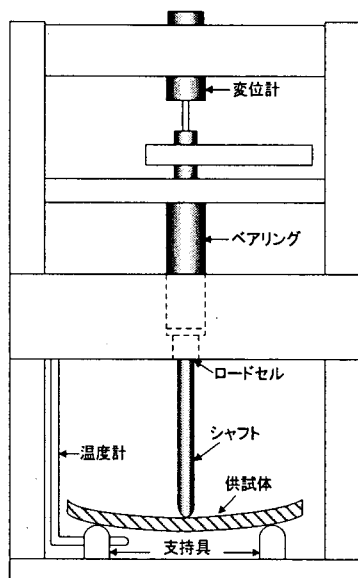


図-2 BBR試験装置

表-2 BBR試験の条件

項目	条件
荷重重 (mN)	980±50
試験温度 (°C)	-30~-5°C

d) RTFO試験

この試験は、膜厚5~10×10⁻⁶m程度のアスファルト試料に高温下で常時新しい空気を吹き込み、その硬化を促

進することにより、アスファルトコンクリート製造時におけるアスファルトの劣化程度を明らかにするものである。試験の条件は表-3に示すとおりである。なお、試験時間については、米国 (SHRP) により85分が提案されているが、これによると試験後の針入度の低下度合いが実際のアスファルトコンクリート製造プラントの場合と比較して大きかったことから、ここでは45分に変更した。

表-3 RTFO試験の条件

項目	規格値
試験時間 (分)	45
試験温度 (°C)	163
試料質量 (g)	35

e) PAV試験

この試験はアスファルトの長期供用後の劣化状態を評価することを目的とし、RTFO試験または薄膜加熱試験後の試料に対して、加圧加熱することにより劣化を促進するものである。この試験では、供用後5年程度の劣化を再現できるとされている。試験条件を表-4に示す。

表-4 PAV試験の条件

項目	規格値
試験時間 (時間)	20
試験温度 (°C)	100
試料質量 (g)	50

(2) 再生アスファルトコンクリート

再生アスファルトコンクリートの力学的性状は、上記のように、促進老化を与えない場合と与えた場合の両方について、曲げ試験により評価した。また、疲労抵抗性を明らかにするために、繰返し曲げ試験も実施した。

a) 曲げ試験

この試験は、舗装試験法便覧に準拠した方法で実施した。ただし、供試体の形状寸法と試験温度、荷重速度は舗装試験法便覧と異なるものとした。供試体は、ローラコンパクタで締め固めて作製した、縦・横300mm、厚さ50mmの試料から、ダイヤモンドカッタを使って幅50mm、長さ300mm、厚さ50mmのものを切り出した。老化作用を与える場合は、供試体を切り出す前の試料に対して実施した。

曲げ試験は、支間を200mmとした2点支持・1点中央荷重方式で、荷重速度ならびに温度一定の条件で実施した。荷重速度は、標準では50mm/minであるが、ここでは航空機

の走行速度が比較的小さい状況を想定して、10mm/minとした。試験温度については、当初-10, 0, 10, 20, 30℃と変動させて試験を実施していたが、脆化点を明確にするために-10, 0, 5, 10, 20℃へと変更した。試験結果は、曲げ強度、破断ひずみならびにスティフネスを求め、これらを特性値として整理した。

b) 繰返し曲げ試験

この試験には、上記の曲げ試験と同様に、幅50mm、高さ50mm、長さ300mmの寸法の供試体を用いた。試験方法としては、2点支持1点载荷の条件（支間250mm）で、変位波形を正弦波（両振り）とする、変位（ひずみ）制御方式を用いた。温度は-10, 0, 5, 10℃の4とおり、変位はひずみ振幅で $1,000 \times 10^{-6} \sim 2,500 \times 10^{-6}$ （片振幅）の範囲で4ないし5とおり変化させた。周波数は既往の研究^{5), 6)}に基づいて5Hzとした。

c) 老化促進方法

アスファルトコンクリートの老化促進方法としては、高温下で酸化させるもの⁷⁾を採用した。具体的な方法は次のとおりである（図-3）。

- ① 60℃に調整した恒温槽（真空乾燥炉）内に、試料を入れる。
- ② 真空ポンプにより恒温槽内の空気を排出する。
- ③ 恒温槽内に酸素を送り込んで充填させる。
- ④ 24時間放置する。

上記①～④を1サイクルとして、これを所定のサイクル数繰り返す。

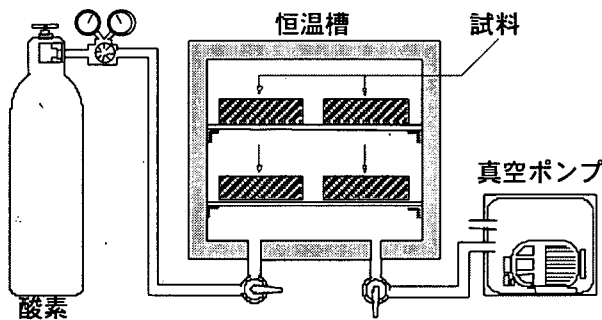


図-3 老化促進試験装置

2.3 使用材料

(1) 再生用添加材

アスファルトコンクリートが自然環境の作用を受けて老化すると、アスファルトの成分はアスファルテンが増加して、芳香族分が減少するように変化する。再生用添加剤は、これを補うために使用されるので、再生アスフ

ァルト中のアスファルテンが減少して、芳香族分が増加する結果となるような効果を有する必要がある。

本研究では、再生用添加剤として、アスファルトの劣化による成分変化に関する既往の知見に基づいて、飽和分ならびに芳香族分にレジンを加えたものに着目し、これらの割合を3種類に変化させた成分となっているものを用いた。具体的には、数多く市販されている再生用添加剤の中から、表-5に示す性状を有する、比較的使用量の多いものを選定した。表中の標準値はプラント再生舗装技術指針に記されている値であり、添加剤AならびにBはこれに適合しているが、添加剤Cは動粘度が標準値の範囲を下回っている。なお、飽和分が多く、芳香族分とレジン分が少ない再生用添加剤ほど動粘度が小さいという傾向が認められる。

表-5 再生用添加剤の性状

項目	A	B	C	標準値	
動粘度 (60°C, mm ² /s)	526	202	46.0	80 - 1000	
引火点 (°C)	327	232	276	230以上	
粘度比	1.10	1.37	1.03	2以下	
質量変化率 (%)	-0.07	-1.78	-0.56	±3以内	
密度 (g/cm ³)	0.974	1.011	0.884	—	
成分 (%)	アスファルテン	0.2	2.0	0.0	—
	飽和分	8.7	51.9	90.3	—
	芳香族分	83.5	33.2	8.7	—
	レジン分	7.6	12.7	1.0	—

(2) アスファルト

再生骨材からソックスレー抽出法により回収したアスファルト（旧アスファルト）の品質については表-6に示してある。針入度については、いずれもプラント再生舗装技術指針に記されている規格を満足している。また、アスファルト量についても、表-7に示したように、その規格を満足している。

新規アスファルトは舗装用石油アスファルト60/80を使用した。その品質もJIS K 2207を満足したものとなっている。

表-6 旧アスファルトの品質

項目	単体試験用	混合物試験用
針入度 (1/100cm)	33	35
軟化点 (°C)	56.0	56.0
伸度 (15°C, cm)	8	8
粘度 (60°C, Pa·s)	742	761
密度 (g/cm ³)	—	1.045

表-7 新規アスファルトの品質

項目	測定値
針入度 (1/100cm)	66
軟化点 (°C)	48.0
伸度 (15°C, cm)	100+
粘度 (60°C, Pa·s)	174
密度 (g/cm ³)	1.037

(3) 骨材

使用した再生骨材は、東京国際空港の旧ターミナル地区における舗装の撤去に伴って発生したものである。いずれもプラント再生舗装技術指針ならびに共通仕様書の規定を満足している。なお、これらの再生骨材自体は、いうまでもなく、少なくとも新規に混合された当時は共通仕様書に規定されている空港舗装用アスファルトコンクリートの品質を満たしていたことになる。

本研究では、再生アスファルトコンクリートの骨材最大粒径を13mmと設定したため、このアスファルト発生材の最大粒径も13mmとして粒度調整を行った。再生骨材の品質と粒度を表-8にまとめた。

新規骨材としては、6号碎石、7号碎石、スクリーニングス、粗砂、細砂ならびに石粉を使用した。これら骨材については、ふるい分け試験、比重試験ならびに吸水率試験を実施した。いずれも、表-9に示すように、共通仕様書等の規定を満足している。

表-8 再生骨材の品質と粒度

項目		測定値	
抽出アスファルト量 (%)		5.95	
粗骨材	比重	表乾	2.662
		かさ見掛	2.633
	吸水量 (%)	表乾	2.713
		かさ見掛	1.12
細骨材	比重	表乾	2.597
		かさ見掛	2.547
	吸水量 (%)	表乾	2.683
		かさ見掛	1.99
理論最大密度 (g/cm ³)		2.478	
通過質量百分率 (%)	(mm)		
	13.2	100	
	4.75	73.1	
	2.36	49.5	
	0.6	28.9	
	0.3	19.4	
	0.15	9.4	
	0.075	6.2	

表-9 新規骨材の品質と粒度

項目	6号碎石	7号碎石	SC*	粗砂	細砂	石粉
比重	表乾	2.634	2.594	2.629	2.578	2.549
	かさ	2.606	2.557	2.605	2.513	2.472
	見掛	2.681	2.653	2.668	2.686	2.680
吸水率 (%)	1.080	1.410	0.900	2.570	3.140	
通過質量百分率 (%)	(mm)					
	19	100				
	13.2	94.2	100	100	100	
	4.75	1.2	97.0	100	99.9	99.9
	2.36	0.2	13.6	96.9	91.6	99.7
	0.6		1.7	39.3	39.6	97.0
	0.3		1.5	25.7	19.0	67.7
	0.15			15.6	6.4	27.4
0.075			10.1	1.9	5.5	

*スクリーニングス

2.4 再生用添加剤の添加量

再生用添加剤の量は、これを旧アスファルトに添加混合した後のアスファルトの針入度が新規アスファルトの針入度、すなわち設計針入度に等しくなるものとした。これはプラント再生舗装技術指針の方法に準拠した方法である。

しかし、新規アスファルトと再生アスファルトの針入度を同一にしたとしても、アスファルトコンクリート製造過程におけるアスファルトの劣化程度が、両者で異なることが懸念される。そこで、ここでは、原則として、新規アスファルト、再生アスファルトをそれぞれ用いて製造したアスファルトコンクリート中のアスファルトの針入度が製造直後の時点で同一になるように添加剤量を決定した。

具体的な添加剤決定方法は、アスファルト単体とアスファルトコンクリートの場合で異なったものとなっている。後者については実際に再生アスファルトコンクリートを製造して、それから回収したアスファルトの針入度に注目すればいいが、前者についてはその方法が採用できない。そこで、前述のアスファルトコンクリート製造時の劣化を再現する方法であるRTFO試験をアスファルトに適用した後の針入度に注目した。具体的な方法については以下に示す。

(1) アスファルト単体

旧アスファルトに添加する再生用添加剤量は、再生アスファルトのRTFO試験後における針入度が新規アスファルトのRTFO試験後のものと同等になるように決定した。

まず、旧アスファルトに3種類の再生用添加剤を3~10%の範囲で添加して再生アスファルトを作製し、RTFO試験を適用した後の針入度を測定した。その結果(図-4)から求められた、新規アスファルトのRTFO試験後の針入度と同等になる添加剤量が、各再生用添加剤の添加量となる。具体的には、3種類の再生用添加剤の添加量は表-10に示すとおりになった。なお、新規アスファルトのRTFO試験後の針入度は48 (1/100cm)であった。

以上のことから、添加量が同一の場合、飽和分の多い再生用添加剤ほど再生アスファルトの針入度が大きくなっていることがわかった。これは飽和分が多い再生用添加剤ほど、表-5に示すように、動粘度が小さいことに起因しているものと考えられる。このように、再生用添加剤の成分によって添加量の増加に伴う針入度変化の割合が大きく異なることから、添加剤の必要量にもかなりの差があるものとなっている。

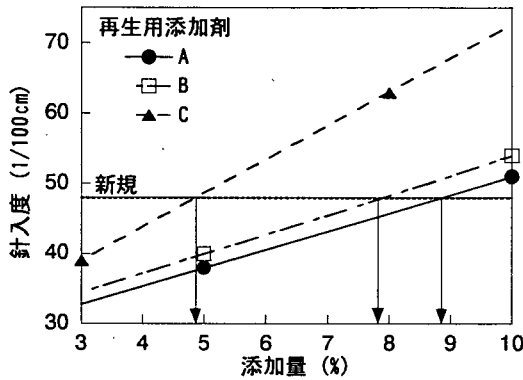


図-4 再生用添加剤添加量と針入度

表-10 再生用添加剤の必要添加量

再生用添加剤	添加量 (%)
A	8.8
B	7.9
C	4.9

(2) アスファルトコンクリート

この場合は、次のような方法を用いた。

- ① 新規アスファルトを用いて製造したアスファルトコンクリートからアスファルトを回収して、その針入度を求める。
- ② 再生骨材から回収した旧アスファルトに、3種類の再生用添加剤を質量比で5%、10%、15%の3とおり添加し、それら再生アスファルトの針入度を測定して暫定添加量を決定する(図-5)。
- ③ 骨材中に占める旧骨材の割合、すなわち旧材料混入率(再生率)を40%としてアスファルトコンクリートを製造する。そのときの旧アスファルトに対する再生用添加剤の添加量は②で求めた暫定添加量を3%増減させたものとする。
- ④ 各再生用添加剤を用いて製造した2種類の再生アスファルトコンクリートからアスファルトを回収して、針入度を測定して添加量と針入度の関係を求める。そして、この関係から、①で得られた新規アスファルトの針入度に

対応する添加量を見つける。その結果、3種類の再生用添加剤の添加量は図-6に示すように求められた。具体的には表-11のようになった。

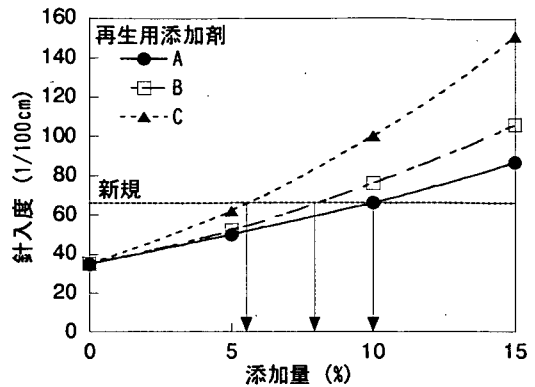


図-5 再生用添加剤の暫定添加量

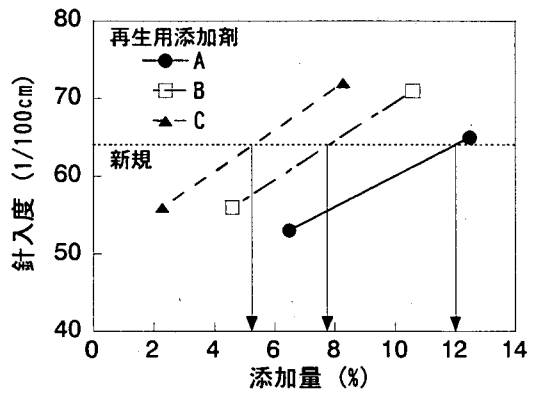


図-6 再生用添加剤添加量と針入度

表-11 再生用添加剤の必要添加量

再生用添加剤	A	B	C
添加量 (%)	12.0	7.7	5.3

2.5 配合設計

(1) 骨材配合

一連の試験では、再生率として空港舗装構造設計要領で規定されている再生率の上限値である40%を用いている。

再生骨材ならびに新規骨材の配合比を表-12にまとめた。また、それぞれの合成粒度を図-7に示した。これらの骨材粒度は、いずれも共通仕様書に規定されている基本施設の①表層タイプI、骨材の最大粒径13mmの粒度範囲に基づき、その中央値を目標粒度として決定した。

表-12 骨材の配合

材料	再生骨材	新規骨材
旧骨材	40	—
6号碎石	28	36
7号碎石	10	23
スクリーニングス	8	17
粗砂	6.5	13
細砂	4.5	6.5
石粉	3	4.5

(単位: %)

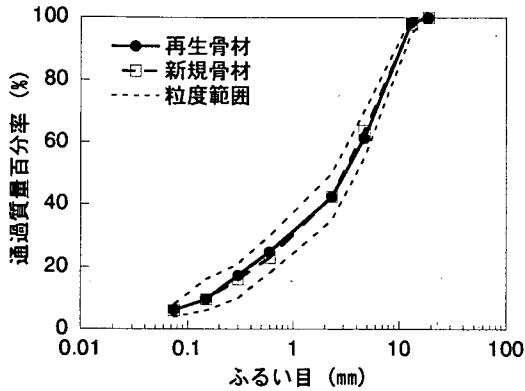


図-7 骨材の合成粒度

(2) 再生アスファルトコンクリートの配合

最適アスファルト量 (OAC) はマーシャル安定度試験の結果に基づいて決定した。このときの基準値は、上記のように、共通仕様書の①表層のものである。得られた最適アスファルト量を用いて作製した、新規ならびに再生アスファルトコンクリートに対するマーシャル安定度試験の結果を表-13に示す。新規材料と再生材料では骨材粒度が多少異なっているため、OACが同じとなっていない。マーシャル安定度試験の結果はどの材料ともほとんど同じであり、すべてが基準値を満足している。

表-13 マーシャル安定度試験の結果

項目	新規	A	B	C	基準値
OAC	5.8	5.4	5.4	5.4	—
密度 (g/cm ³)	2.383	2.422	2.411	2.410	—
空隙率 (%)	2.7	2.2	2.7	2.7	2~5
飽和度 (%)	83.1	84.9	82.4	82.3	75~85
安定度 (kN)	12.9	16.1	15.1	14.1	8.8以上
フロー値 (1/100cm)	37	36	37	37	—

3. アスファルトの性状

再生用添加剤を使用して再生した再生アスファルトの性状を評価した。ここでは、老化作用のない再生アスファルト調整時に加え、前述のように、アスファルトコンクリート製造後ならびに施工してある程度供用された状態での性状に注目した。

3.1 老化作用なし

3種類の再生用添加剤を用いて調整した再生アスファルトが何ら老化作用を受けないときの性状についてまとめる。

表-14は、従来より実施されている一般的な試験により判明した再生アスファルトの性状を示したものである。表-6、表-7に示した旧アスファルトならびに新規アスファルトの性状と比較すると、再生アスファルトの性状が大幅に改善されていることが明らかである。再生用添加剤の違いをみれば、伸度については再生用添加剤Cを用いたものが小さい値を示したが、それ以外の項目については違いはほとんどないことがわかる。

表-14 老化作用を受けない再生アスファルトの性状

項目	A	B	C
針入度 (25℃, 1/100cm)	56	59	55
軟化点 (℃)	50.5	51.0	51.0
伸度 (15℃, cm)	90	100+	49
60℃密度 (Pa·s)	297	318	352
IR試験	吸収あり	吸収あり	吸収あり

次に、DSR試験の結果である複素弾性率(G^*)、損失正接($\tan\delta$)をそれぞれ図-8、図-9にまとめた。複素弾性率、損失正接のいずれをみても、旧アスファルトと新規アスファルトのものの中にあることから、再生アスファルトは旧アスファルトの性状を改善できていること、すなわち、変形抵抗性が小さく、また粘性的傾向をより有するようになったことがわかる。再生用添加剤の違いについてみれば、添加剤Cを用いたものが性状の改善程度が少ないことのほか、変形抵抗性では添加剤Aが、粘性的傾向では添加剤Bによる改善効果が相対的に優れていることも明らかである。

BBR試験結果であるスティフネス(S_t)、その勾配(m)を、それぞれ図-10、図-11に示した。再生アスファルトのスティフネスは新規ならびに旧アスファルトの両方よりも小さくなっており、温度変化による発生応力が小さくな

っていること、スティフネス勾配はおおきくなっていることから応力緩和は大きいことがわかる。再生添加剤による違いをみれば、スティフネス、勾配とも再生添加剤による差は小さいものの、スティフネスは添加剤Cの場合が小さいとの傾向がみられる。

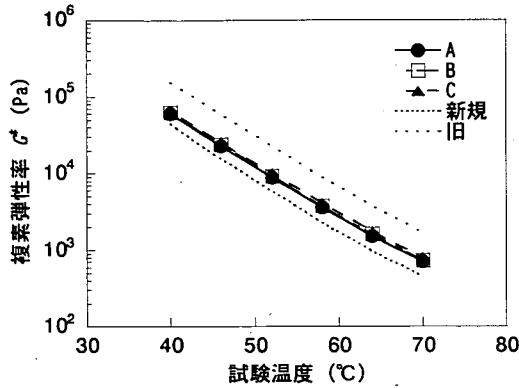


図-8 老化なしでの複素弾性率 (DSR試験)

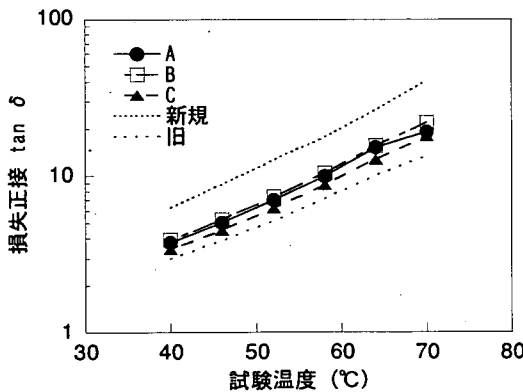


図-9 老化なしでの損失正接 (DSR試験)

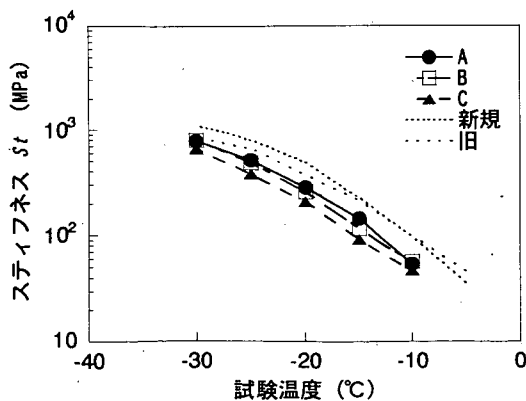


図-10 老化なしでのスティフネス (BBR試験)

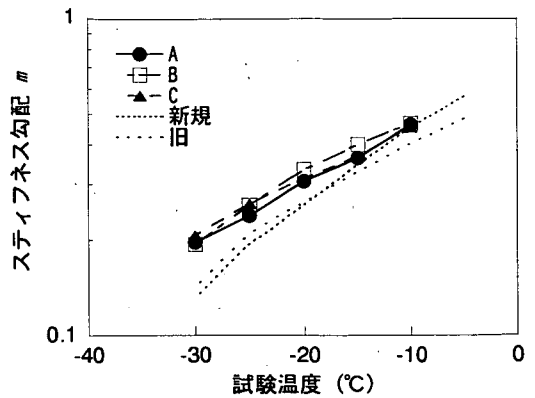


図-11 老化なしでのスティフネス勾配 (BBR試験)

3.2 回転式薄膜加熱試験後

回転式薄膜加熱 (RTFO) 試験後における再生アスファルトならびに新規アスファルトの性状を表-15に示した。3種類の再生添加剤を用いた再生アスファルトは、いずれも軟化点、伸度、粘度の点で老化傾向が明らかである。これは、新規アスファルトに比べて針入度が若干小さくなったことも事実ではあるが、赤外線分析試験の結果で新規と再生アスファルトでカルボニル基の形成に違いがあることから、再生アスファルトの性状は新規アスファルトと同等になるまで回復するようなことはないことを意味していると考えられる。再生添加剤の違いをみれば、前述の老化作用なしの場合にみられた傾向がより顕著に現れており、添加剤Cを用いたものが最も老化が著しく、次に添加剤Aを用いたものとなっている。

表-15 RTFO試験後のアスファルトの性状

項目	新規	A	B	C
針入度 (25°C, 1/100cm)	48	45	46	44
軟化点 (°C)	51.0	53.0	53.0	54.0
伸度 (15°C, cm)	70	18	25	9
60°C粘度 (Pa·s)	279	492	464	581
IR試験	吸収なし	吸収あり	吸収あり	吸収あり

DSR試験の結果である複素弾性率と損失正接を図-12、図-13に示した。いずれの再生アスファルトも新規アスファルトより老化している傾向がみられるが、両者の差は老化なしの場合に比べて若干小さくなっていることがわかる。再生添加剤の違いでは、添加剤Cを用いたものが、複素弾性率、損失正接の両者をもみても老化傾向が大きいことが認められる。

BBR試験結果であるスティフネス、その勾配を図-14、図-15に示した。スティフネス、その勾配とも再生アスファルトと新規アスファルトの違いが、老化のない場合と同様にみられている。また、再生添加剤による違いでも、老化なしの場合と同様であり、添加剤Cを用いたもののスティフネスが小さくなっている。

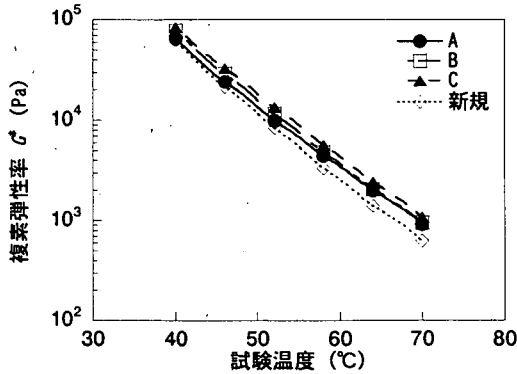


図-12 RTFO試験後の複素弾性率 (DSR試験)

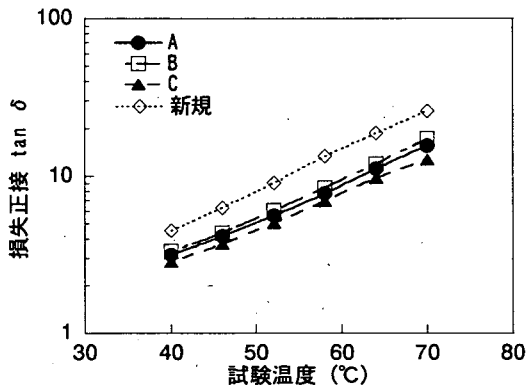


図-13 RTFO試験後の損失正接 (DSR試験)

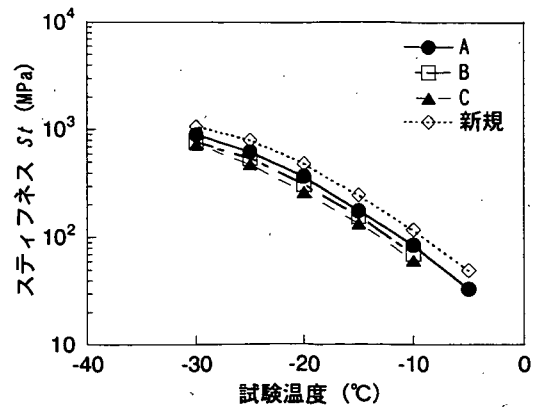


図-14 RTFO試験後のスティフネス (BBR試験)

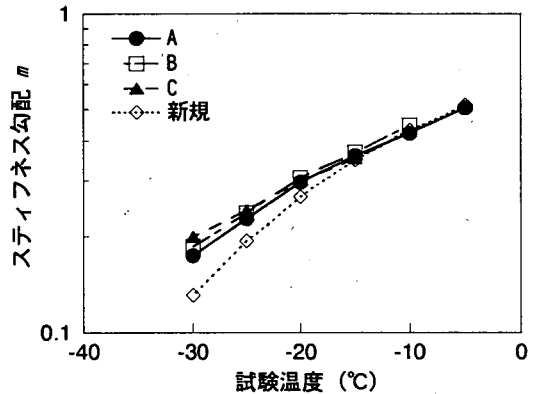


図-15 RTFO試験後のスティフネス勾配 (BBR試験)

3.3 回転式薄膜加熱試験・加圧劣化試験後

回転式薄膜加熱 (RTFO) 試験ならびに加圧劣化 (PAV) 試験後のアスファルトの性状について表-16に示した。この程度の老化作用を与えることにより、再生アスファルトと新規アスファルトの性状には相違点は見られなくなる。RTFO試験ではカルボニル基の生成がみられなかった新規アスファルトにおいても、この段階では老化作用がみられている。なお、再生アスファルトにおける、再生添加剤の違いによる差はほとんどみられない。

表-16 RTFO・PAV試験後のアスファルトの性状

項目	新規	A	B	C
針入度 (25°C, 1/100cm)	23	31	30	30
軟化点 (°C)	60.5	59.0	60.0	61.0
伸度 (15°C, cm)	5.5	5	5.5	4.5
60°C粘度 (Pa·s)	1514	1259	1400	1959
IR試験	吸収あり	吸収あり	吸収あり	吸収あり

DSR試験結果を示した図-16（複素弾性率）、図-17（損失正接）から新規アスファルトと再生アスファルトの力学特性にはほとんど差のみられないことがわかる。特に前者においては、新規アスファルトのほうが値が大きいことから、逆に老化が進行しているような傾向が認められる。再生アスファルトの性状が再生添加剤により異なる状況を見ると、複素弾性率では差はないものの、損失正接においては添加剤Cを用いたものが老化程度は大きいようであることがわかる。

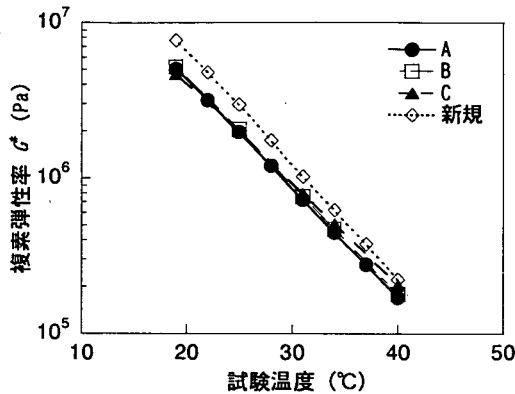


図-16 RTFO・PAV試験後の複素弾性率（DSR試験）

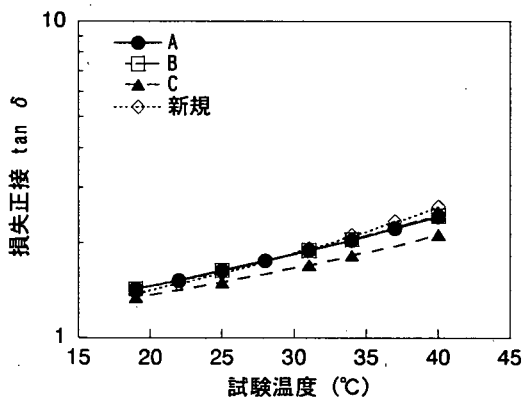


図-17 RTFO・PAV試験後の損失正接（DSR試験）

BBR試験結果である、スティフネスを図-18に、スティフネス勾配を図-19に示した。RTFO試験後にみられた性状変化がさらに進み、新規アスファルトはほとんどの温度領域において再生アスファルトよりもスティフネスが大きく、その勾配は小さいことがわかる。このことは、舗装供用後の老化という観点からは新規アスファルトが最も早く進行していることを意味している。再生添加剤

による違いをみれば、添加剤Cを用いたものが若干ではあるが老化傾向が少ないものと思われる。

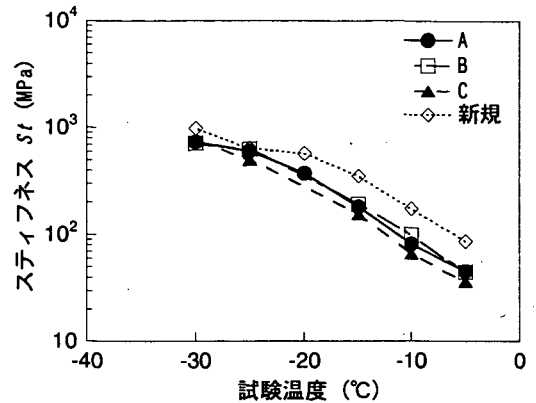


図-18 RTFO・PAV試験後のスティフネス（BBR試験）

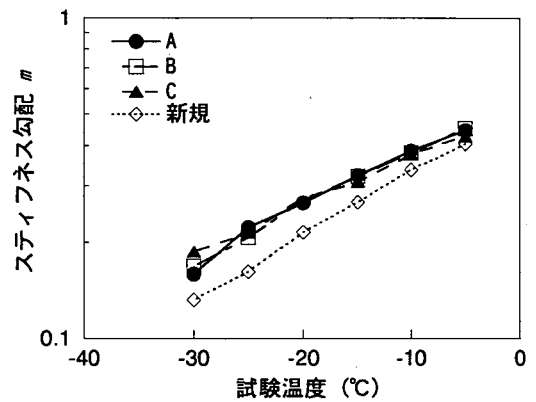


図-19 RTFO・PAV試験後のスティフネス勾配（BBR試験）

3.4 老化に伴うアスファルトの性状変化

老化作用を与えることによって生ずる、アスファルトの性状変化についてまとめる。

まず、針入度について図-20に示す。老化のない状態で再生アスファルトと新規アスファルトにみられた差は老化作用の進行により小さくなり、最終的には逆転することが認められた。具体的には、針入度は、再生アスファルトの場合RTFO試験後には45(1/100cm)、PAV試験後には30(1/100cm)となるのに対して、新規アスファルトの場合にはそれぞれ、48(1/100cm)、23(1/100cm)となっている。針入度でみる限り、供用中の耐老化性は再生アスファルトのほうが優れていると判断される。なお、老化作用の進行後は再生添加剤による違いはほとんどみられなくなる。

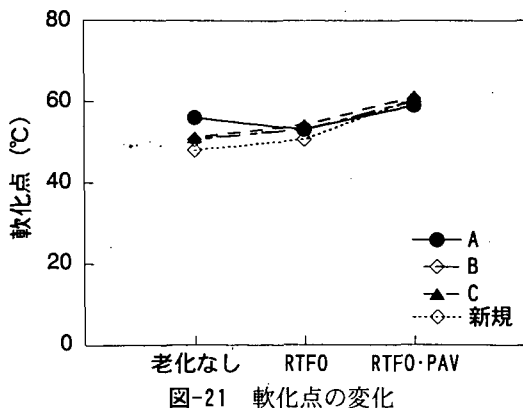
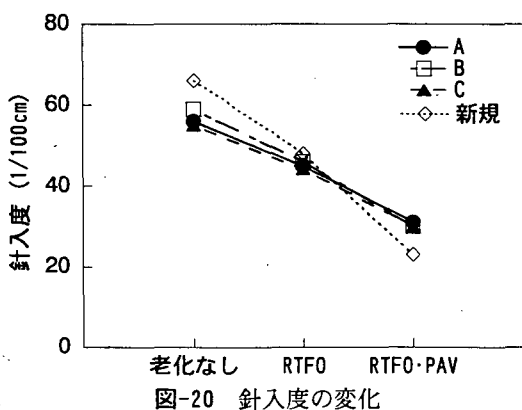
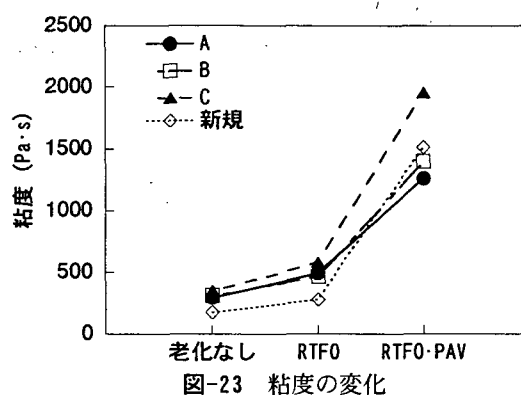
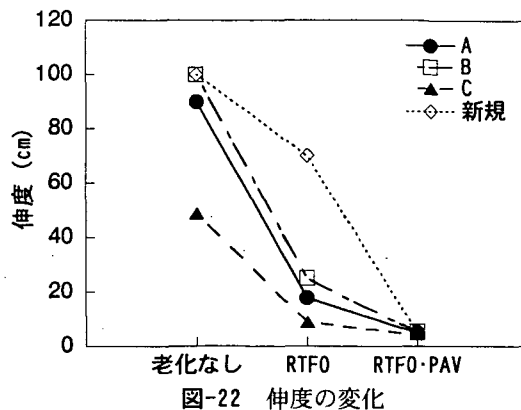
軟化点について図-21に示す。これも、針入度と同様に、

老化作用の進行に伴って、再生アスファルトと新規アスファルトの差が小さくなり、RTFOならびにPAV試験後には差がほとんどみられなくなる。また、再生添加剤による違いも明らかではない。

伸度について図-22に示す。老化なしでは新規アスファルトと再生アスファルトで、また再生添加剤の間で大きな差がみられたが、老化作用の進行により最終的にはほぼ同じ値となってしまうことがわかる。

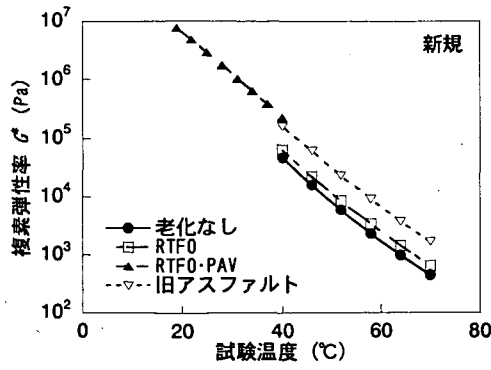
これらに対して、粘度においては新規・再生アスファルトの違い、再生用添加剤の違いによる影響がみられる(図-23)。すなわち、老化なしとRTFO試験後までは新規アスファルトが優位であったが、RTFOならびにPAV試験後には、新規と再生アスファルトの差はみられなくなった。再生添加剤の違いによる影響は、上記の項目と異なって、明らかに添加剤Cを使用したものが老化が進行している。

以上のように、新規アスファルトはアスファルトコンクリート製造時の劣化を再現するとされるRTFO試験に比べて、供用中の老化を再現するとされるPAV試験によって老化が著しく進行する。これは、両者で劣化機構が異なり、前者は脱水素縮合、後者は酸化重合と、酸化反応の形態が異なっているためであると考えられる。

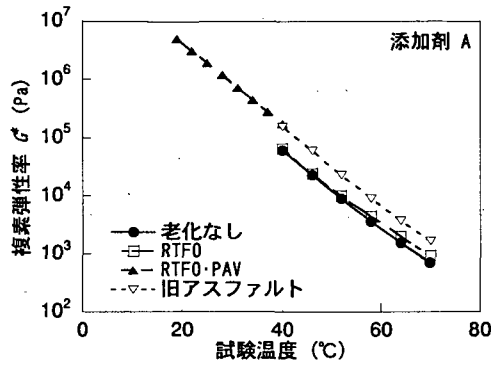


次に、DSR試験結果である複素弾性率と損失正接について老化作用の進行に伴う変化を、図-24、図-25にまとめた。両者とも老化現象が現れるようになるが、損失正接についてはそれが著しく、旧アスファルトの値を下まわるまでになることがわかる。

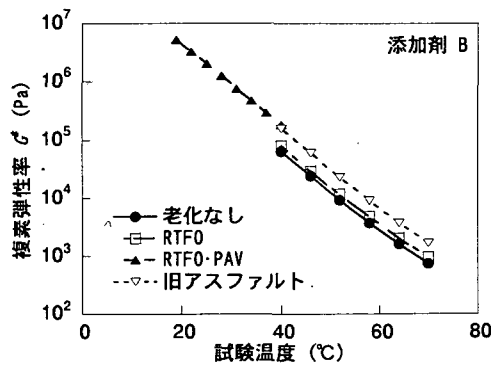
BBR試験結果である、老化作用の進行に伴うスティフネスの変化を図-26に、スティフネス勾配の変化を図-27に示す。いずれのアスファルトにも老化現象が現れてくるが、RTFOならびにPAV試験後をみると、スティフネスについては新規アスファルトと添加剤Aを用いた再生アスファルトで旧アスファルトを超えるほどの値となり、老化が著しく進行したことがわかる。またスティフネス勾配については、スティフネスと同様に、RTFOならびにPAV試験後にはいずれのアスファルトにおいても老化が進行していること、特に、新規アスファルトと添加剤Aを用いた再生アスファルトで著しいことがわかる。ただし、-30°Cのデータをみると添加剤BならびにCを用いた再生アスファルトは旧アスファルトよりもいくぶん良好な性状を示していると思われる。



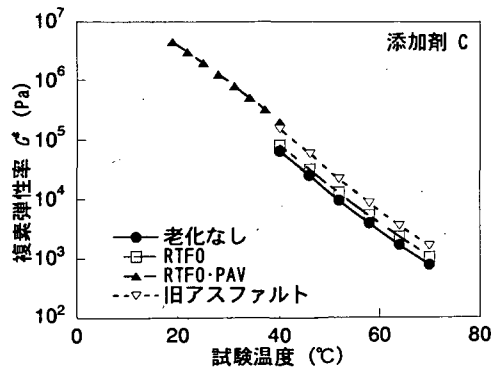
a) 新規アスファルト



b) 再生アスファルト (添加剤A)

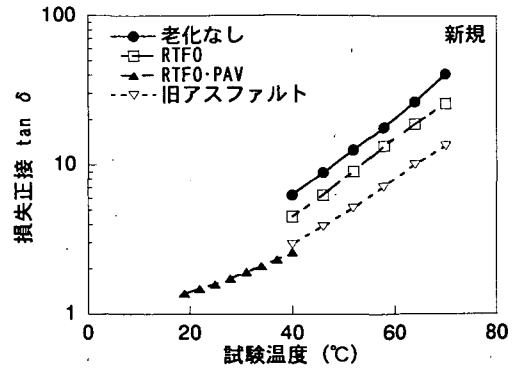


c) 再生アスファルト (添加剤B)

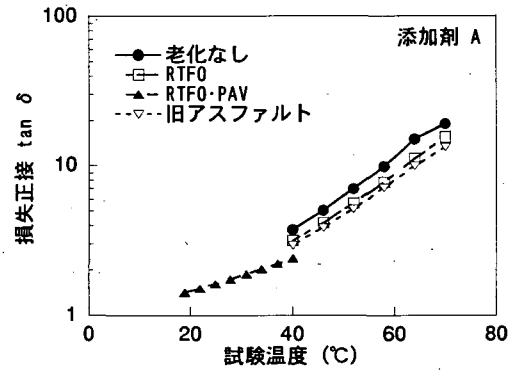


d) 再生アスファルト (添加剤C)

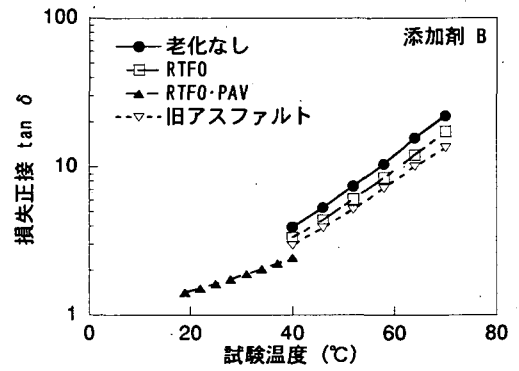
図-24 老化に伴う複素弾性率の変化



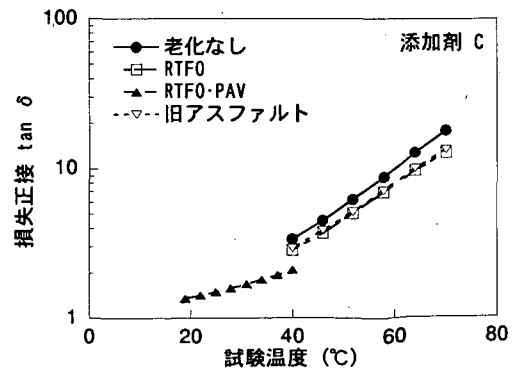
a) 新規アスファルト



b) 再生アスファルト (添加剤A)

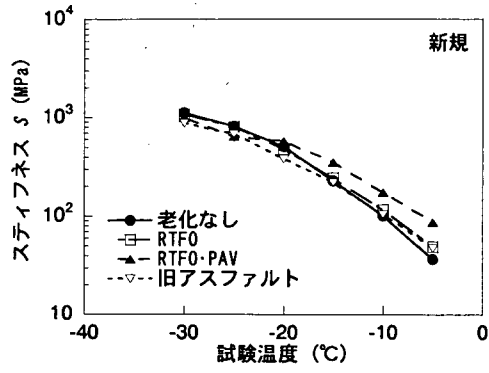


c) 再生アスファルト (添加剤B)

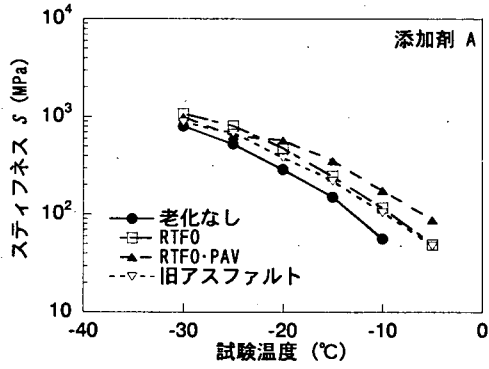


d) 再生アスファルト (添加剤C)

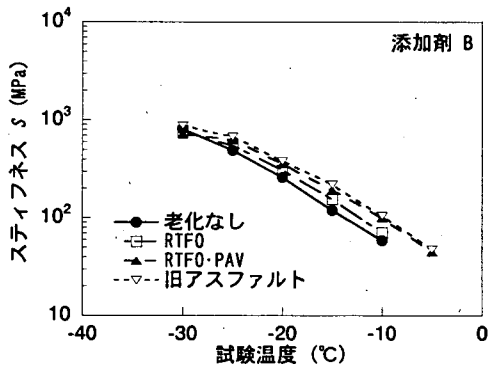
図-25 老化に伴う損失正接の変化



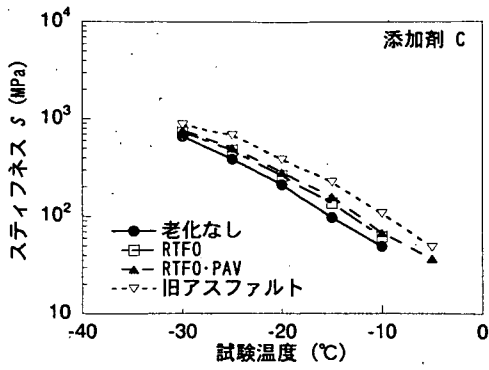
a) 新規アスファルト



b) 再生アスファルト (添加剤A)

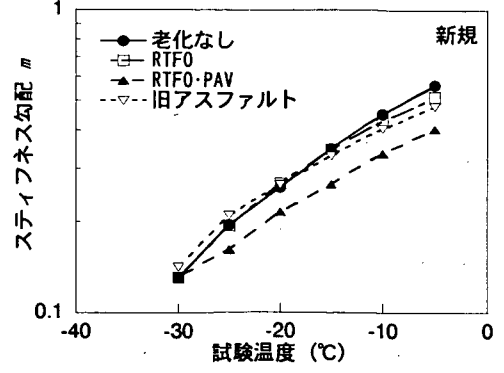


c) 再生アスファルト (添加剤B)

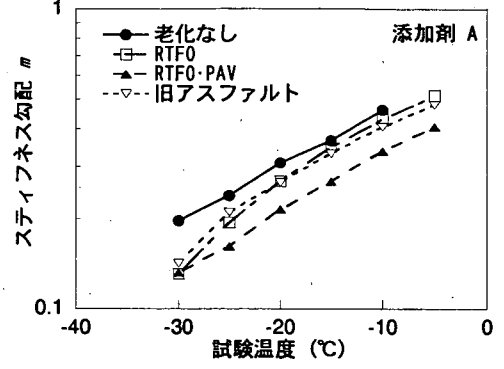


d) 再生アスファルト (添加剤C)

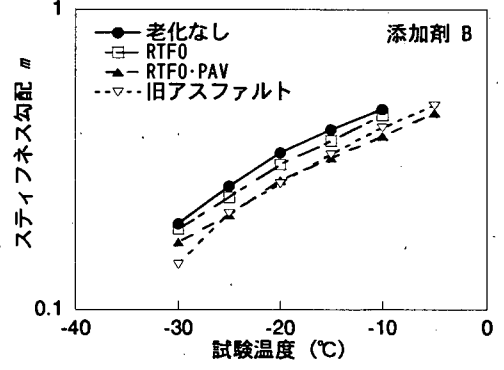
図-26 老化に伴うスティフネスの変化



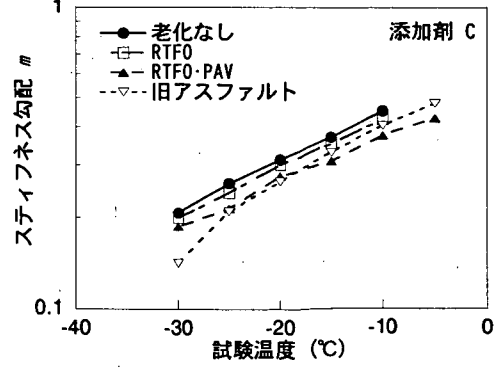
a) 新規アスファルト



b) 再生アスファルト (添加剤A)



d) 再生アスファルト (添加剤B)



d) 再生アスファルト (添加剤C)

図-27 老化に伴うスティフネス勾配の変化

4. アスファルトコンクリートの性状

再生アスファルトの混合物レベルでの性状を比較するために曲げ試験と繰返し曲げ試験を行って評価した⁸⁾。材料としては、上記のように、アスファルトコンクリート製造後のアスファルトの針入度がほぼ同一となるように配合設計された、3種類の再生用添加剤を用いた再生アスファルトコンクリートと新規アスファルトコンクリートを用いた。ここでは、再生アスファルトコンクリートの長期供用に対する耐久性についても注目するために、促進老化を与えた供試体についても試験を実施した。

4.1 曲げ試験による評価

(1) 老化のない場合

老化促進を施していない場合について、曲げ強度が温度によって変化する状況を図-28に示した。全体的な傾向としては、再生材料は新規材料よりも曲げ強度が大きくなっていることがわかる。この曲げ強度については、温度と強度の関係により推定した、脆化点の高温側では明確な差は見られないが、低温側では添加剤BとCを使用したものが新規材料よりも大きいことがわかる。この傾向は特に脆化点に近い温度で顕著である。

同様に、破断ひずみについて図-29に示した。この場合は温度が高い条件で材料による違いが現れている。すなわち、添加剤BとCを使用したものは新規材料と大きな差はないが、添加剤Aを使用したものは新規材料に比べて破断ひずみが小さくなっている。

以上のように、アスファルトコンクリートが老化していない条件では、曲げ強度は低温域で、破断ひずみは高温域で、添加剤の種類による性状の違いが顕著に認められる。

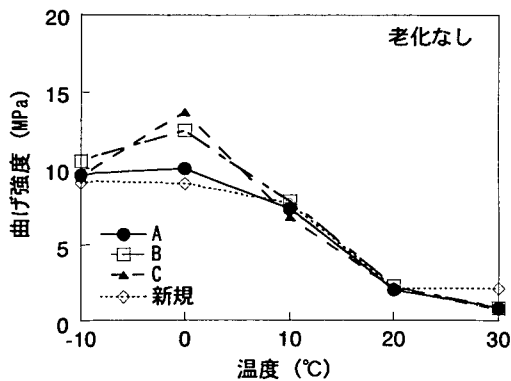


図-28 温度と曲げ強度の関係 (促進老化なし)

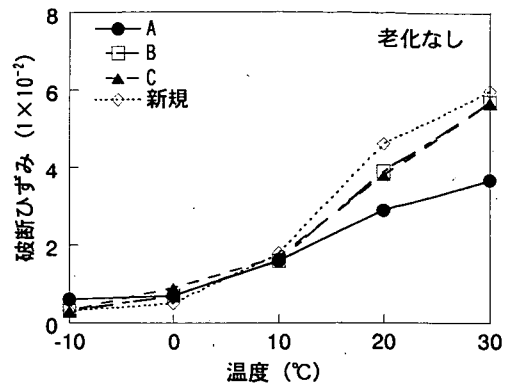


図-29 温度と破断ひずみの関係 (促進老化なし)

(2) 老化のある場合

促進老化の作用を5サイクル施した場合の曲げ強度、破断ひずみを図-30、図-31に、同様に20サイクル施した場合の曲げ強度、破断ひずみを図-32、図-33に示した。

全体的に老化が進行するにつれて各材料間の性状の違いが小さくなっていることがわかる。すなわち、促進老化を施さない場合は、脆化点よりも低温域で曲げ強度に、高温域で破断ひずみに材料による違いが認められたが、老化が進行するに従って、その差が小さくなっており、再生材料と新規材料の差もかなり小さくなっている。

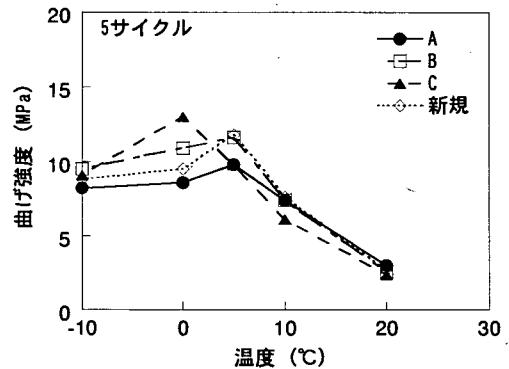


図-30 温度と曲げ強度の関係 (5サイクル)

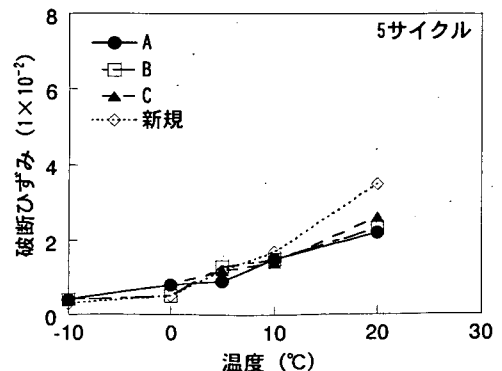


図-31 温度と破断のひずみの関係 (5サイクル)

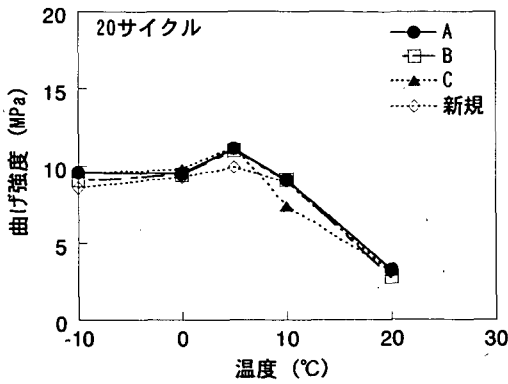


図-32 温度と曲げ強度の関係 (20サイクル)

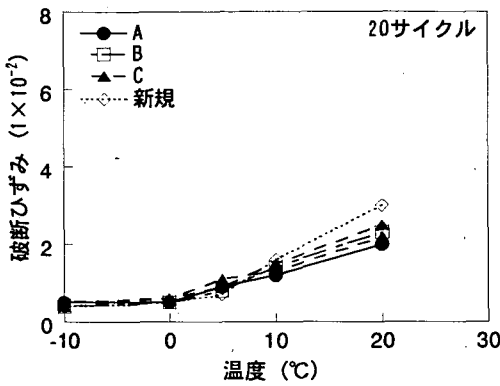
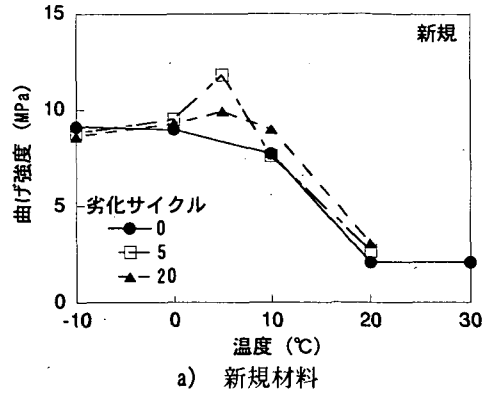
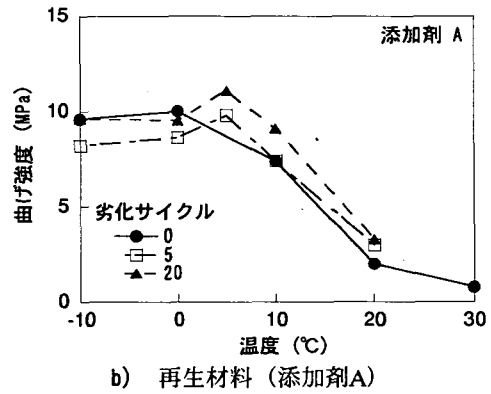


図-33 温度と破断ひずみの関係 (20サイクル)

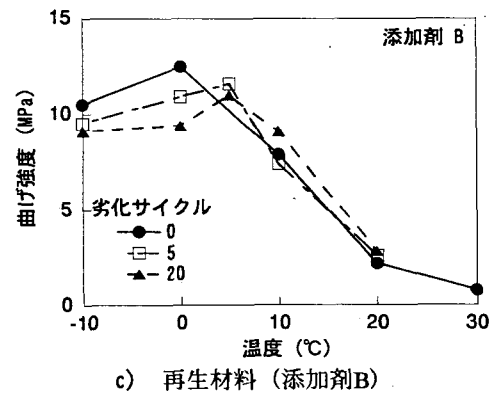
各材料について、老化の進行に伴う曲げ強度ならびに破断ひずみの変化状況をそれぞれ図-34、図-35に示す。曲げ強度においては、脆化点が材料の老化に伴って高温側に移動してくることが明らかで、そのため曲げ強度自体にも変化が認められる。特に、再生用添加剤BとCを使用した場合は、低温域での強度低下が著しい。また、破断ひずみについては、老化が進行するに従って脆化点よりも高温域において低下していることがわかる。いずれの段階でも再生材料のほうが新規材料よりも小さい傾向にあるが、なかでも添加剤Aを使用したものが全般的に破断ひずみが小さくなっている。



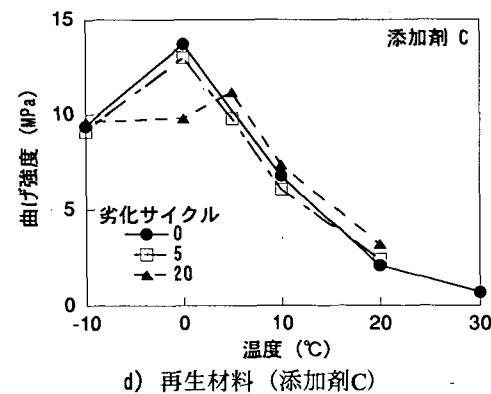
a) 新規材料



b) 再生材料 (添加剤A)



c) 再生材料 (添加剤B)



d) 再生材料 (添加剤C)

図-34 老化に伴う曲げ強度の変化

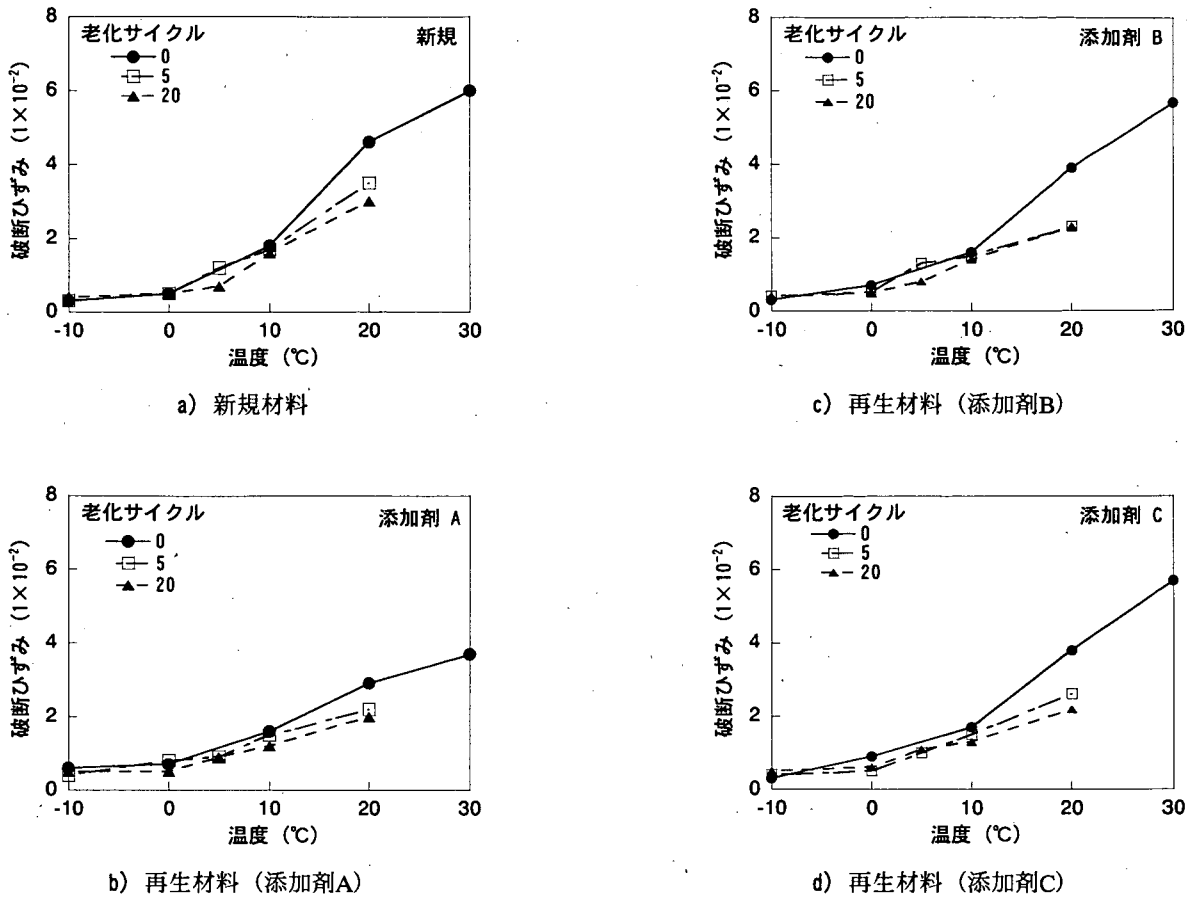


図-35 老化に伴う破断ひずみの変化

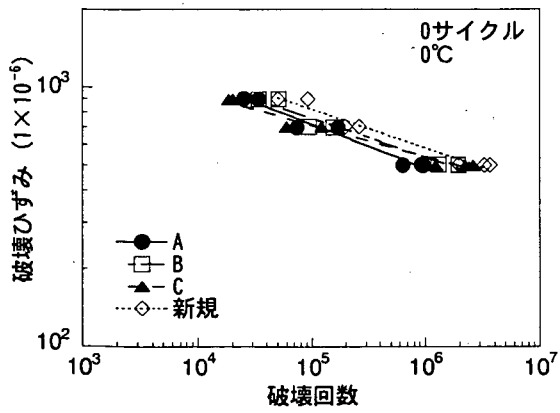
4.2 繰返し曲げ試験による評価

繰返し曲げ試験の結果は、前述のように、破壊応力と破断ひずみ（ひずみ振幅）として整理した。図-36、図-37、図-38には、破断ひずみと破壊回数（ひずみ振幅）の関係について示した（それぞれ、老化なし、老化5サイクル、老化20サイクル）。同様に、破壊応力について図-39、図-40、図-41に示した。

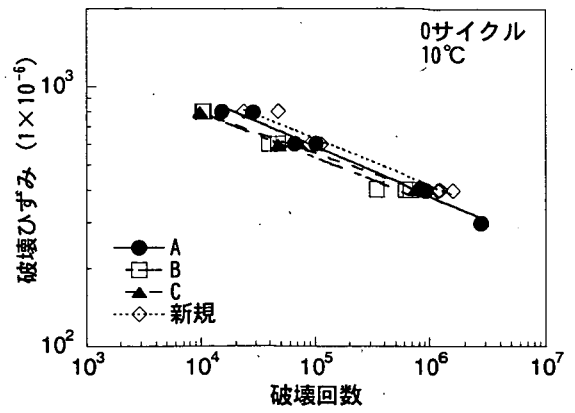
破断ひずみ、破壊応力とも、老化のない場合には新規アスファルトを用いたものが疲労抵抗性が若干高い傾向がみられるが、老化作用を受けることによって新規と再生アスファルトを用いることの違いはなくなるようである。また、再生用添加剤による違いも明確ではない。

図-42、図-43には、破壊ひずみと破壊回数の関係が、アスファルトコンクリートの老化程度によって変化する状況を示してある（試験温度はそれぞれ、0℃、10℃）。新規材料の場合には、老化の進行に伴って疲労抵抗性がいく分低下する傾向がみられるものの、再生材料の場合にはそのような傾向は認められない。これは再生用添加剤の種類によらない。

以上のことを総括すると、新規材料は老化作用を受けないときには再生材料よりも疲労抵抗性は高いものの、老化の進行につれて両者の差はなくなり、再生材料については老化の進行に伴って疲労抵抗性が変化する状況は明確ではなくなるとまとめられる。

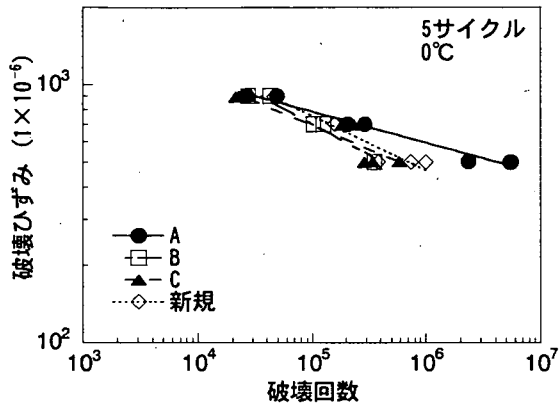


a) 0°C

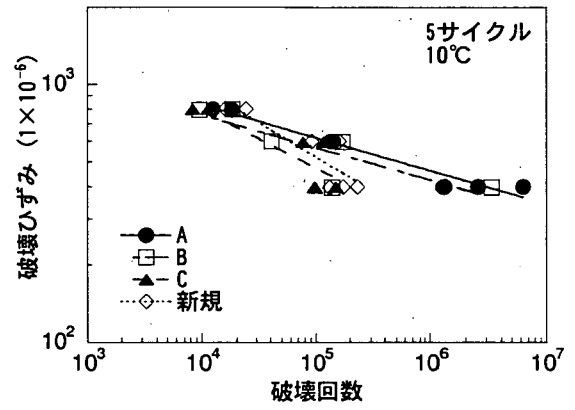


b) 10°C

図-36 破断ひずみと破壊回数 (0サイクル)

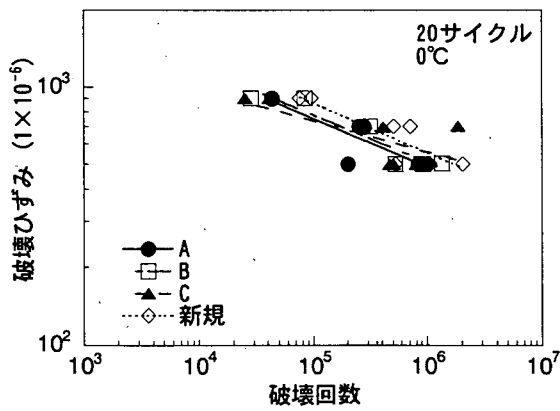


a) 0°C

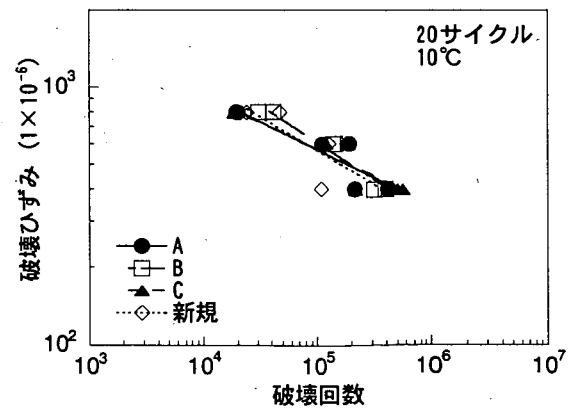


b) 10°C

図-37 破断ひずみと破壊回数 (5サイクル)



a) 0°C



b) 10°C

図-38 破断ひずみと破壊回数 (20サイクル)

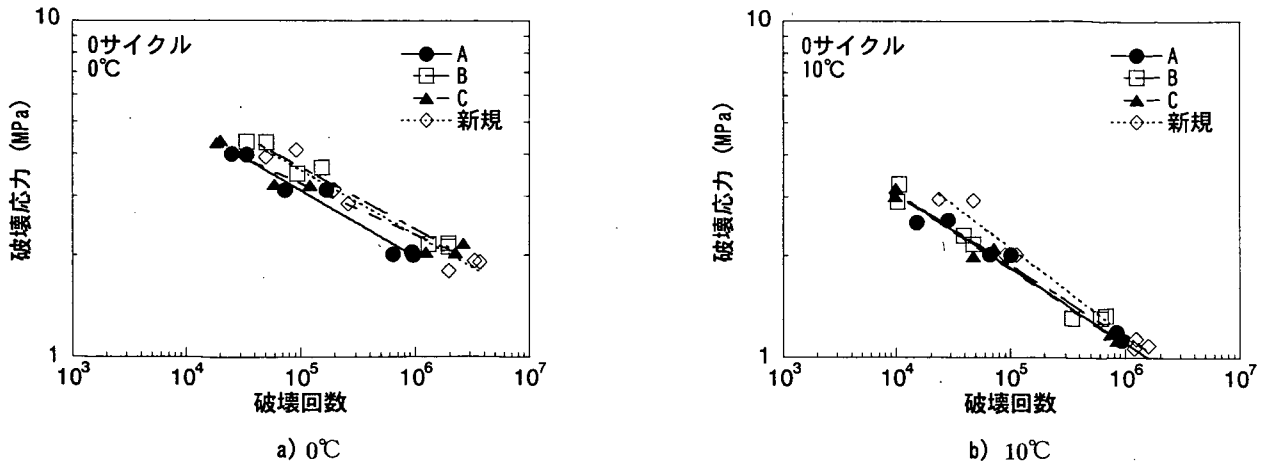


図-39 破壊応力と破壊回数 (0サイクル)

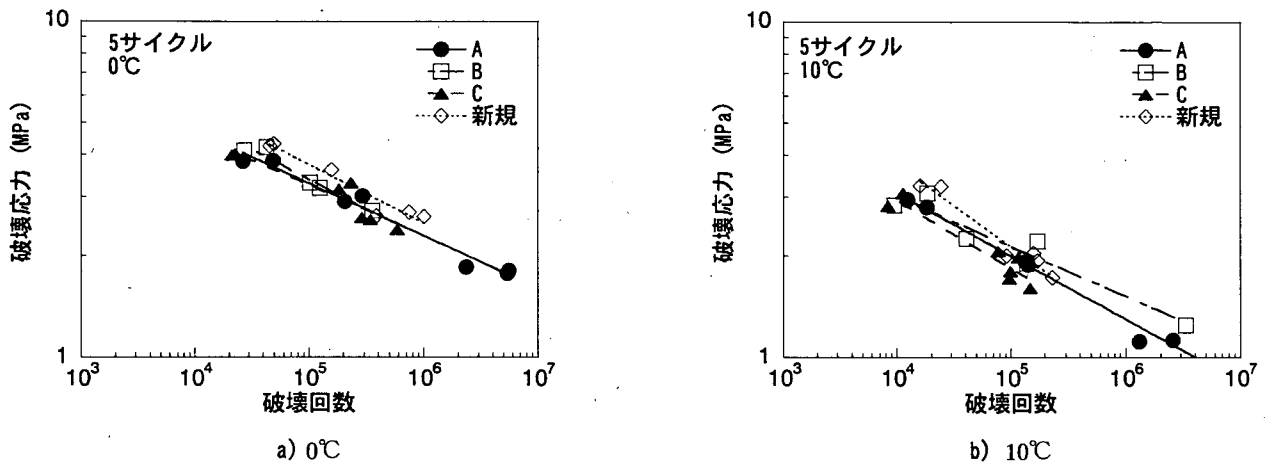


図-40 破壊応力と破壊回数 (5サイクル)

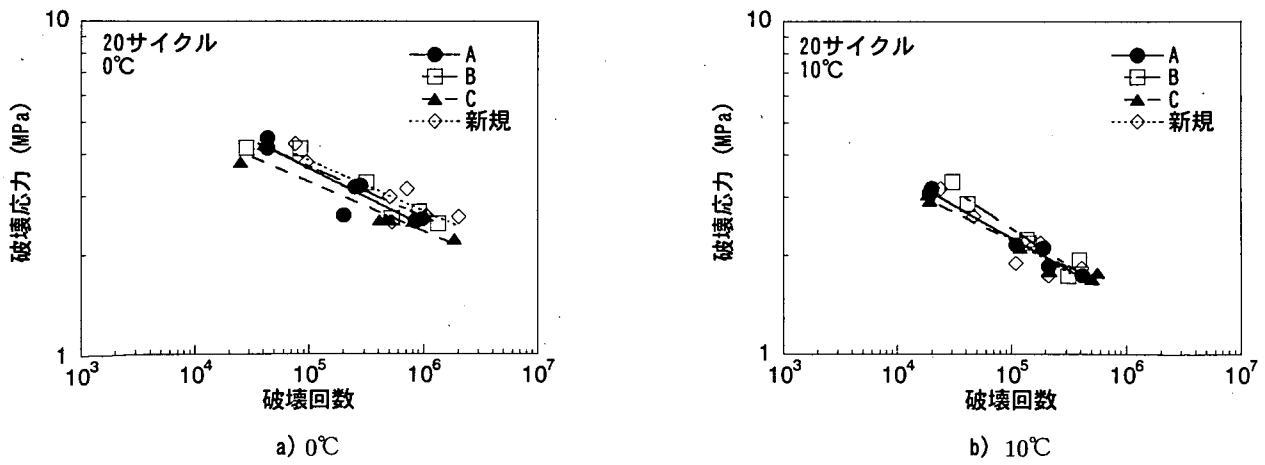


図-41 破壊応力と破壊回数 (20サイクル)

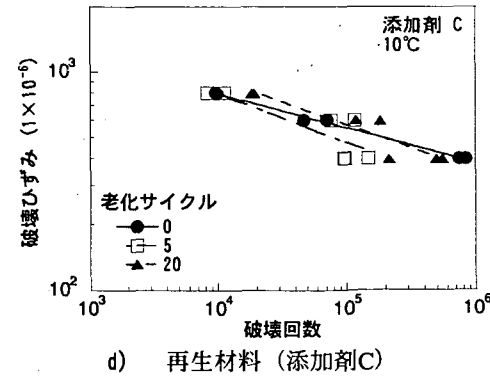
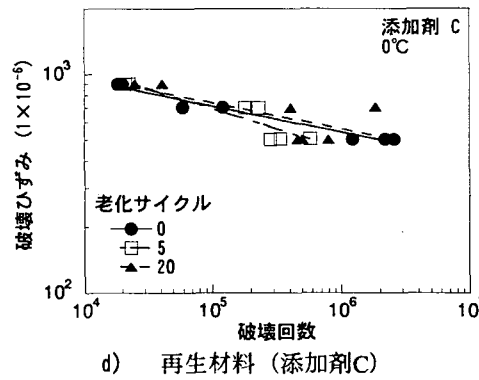
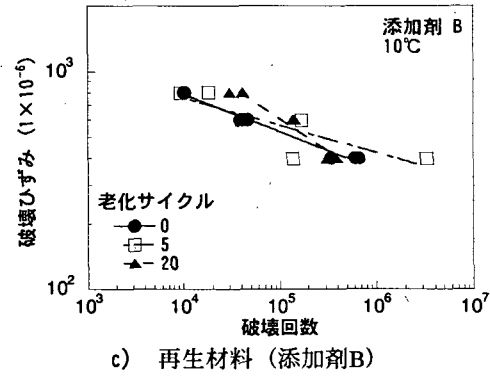
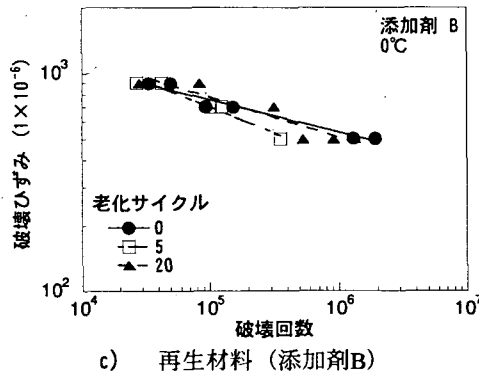
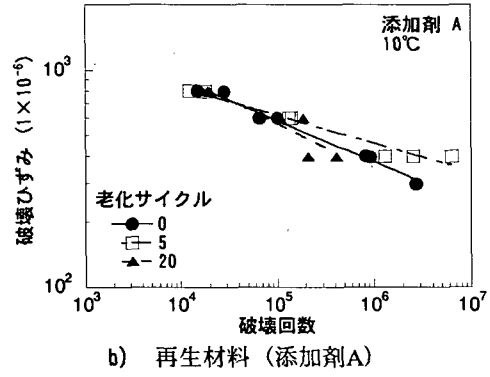
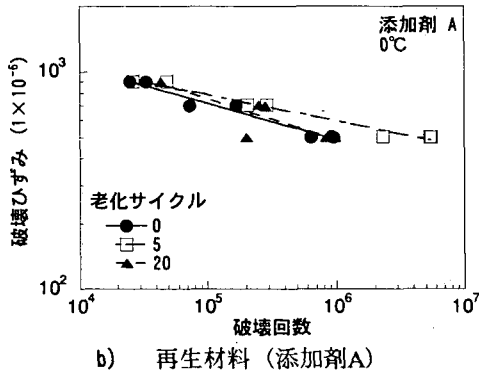
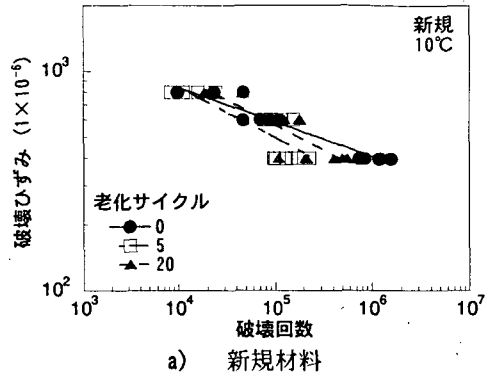
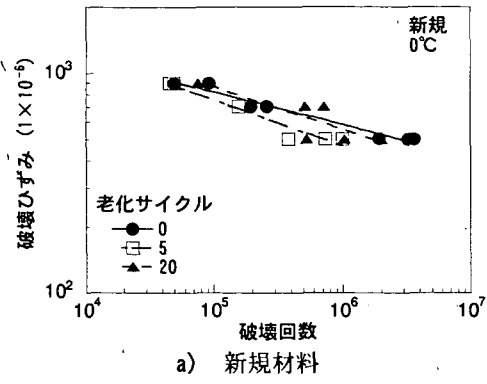


図-42 老化に伴う破壊ひずみの変化 (0°C)

図-43 老化に伴う破壊ひずみの変化 (10°C)

5. まとめ

本研究では、再生アスファルトコンクリートの配合設計において重要となる、アスファルトの再生用添加剤の基本的特性について検討した。ここでは、成分が大きく異なる3種類の再生用添加剤を用いて、再生アスファルトならびに再生アスファルトコンクリートを製造し、再生用添加剤の成分の違いによる影響を評価した。

再生アスファルトの特性に関しては、次のような知見が得られた。

- (1) アスファルトコンクリート製造後（回転式薄膜加熱試験後）のアスファルトの針入度が同等になるように再生用添加剤の添加量を決定した場合、成分として飽和分を多く含むものは添加量が少なくてもよいことがわかった。
- (2) 再生用添加剤を添加して再生することにより旧アスファルトの性状は大幅に改善される。再生用添加剤のうち飽和分を多く含むものは改善効果が小さいことがわかった。
- (3) 再生アスファルトの性状について回転式薄膜加熱試験後のものをみると、新規アスファルトに比べて老化はしているものの、その差は小さくなっていることがわかった。また、新規と再生アスファルトでカルボニル基の形成に違いのあることもわかった。再生用添加剤の違いでは、飽和分を多く含むものが老化の進行が早くなっている。
- (4) 加圧劣化試験後における特性をみれば、新規と再生アスファルトの差は明確ではなく、逆に新規アスファルトのほうが老化が進行している傾向がみられるものもある。再生用添加剤の違いでは飽和分を多く含むものが老化が進んでいる。

再生アスファルトコンクリートの特性に関して得られた知見は以下のようなものである。

- (1) 再生用添加剤の添加量をアスファルトコンクリート製造後における再生アスファルトの針入度が同じになるように決定すると、添加量は再生用添加剤の成分の違いによって大きく変化する。今回選定したもののうちでは、飽和分の多い再生用添加剤ほど、添加量が少ない結果となった。
- (2) 劣化が生じていない再生アスファルトコンクリートでは再生用添加剤の違いによって曲げ特性に差違が認められるが、劣化が進行するにつれてその差は小さくなる。しかし、破断ひずみは劣化がかなり進行した状態でも、再生材料のほうが新規材料よりも小さい傾向にある。また、老化が進行するにつれて、アスファルトコンクリートの脆化点は高温側に移動する。
- (3) 芳香族分とレジジン分の多い再生用添加剤は、添加量

が多く必要となり、これを用いた再生アスファルトコンクリートでは、老化に伴って低温時の曲げ強度が低下し、破断ひずみも小さくなる傾向が認められた。

(4) 芳香族分とレジジン分が少なく、飽和分の多い再生用添加剤は、必要とされる添加量は少ないが、再生アスファルトコンクリートの曲げ強度は老化につれて低下する程度が大きい。

(5) 再生アスファルトコンクリートの疲労抵抗性には再生用添加剤による違いがみられず、いずれも老化が進行しても大きく変わることはない。老化のない場合は新規材料より疲労抵抗性は小さいが、老化の進行につれて両者の差はなくなる。

6. おわりに

アスファルト再生用添加剤は、ここで取り上げた3種類以外にも数多くのものである。それらについて全てを対象としたわけではないが、本研究によりプラント再生舗装技術指針に示されている規定を満足する材料であっても、特性には大きな差のあることが認識できたものと考えている。

今後の課題としては、再生用添加剤の効果を、さらに多くの方法による評価やより実際に即した方法により、評価する必要があることが挙げられる。また、さらに多くの種類（成分割合が異なる）の再生用添加剤についても評価を行い、一般性を向上させる必要があるといえよう。

いずれにしろ、再生用添加剤がプラント再生指針の規定を満たすものであっても、これを用いて再生されたアスファルトならびにアスファルトコンクリートの特性に差がみられたことから、これらの違いが許容されるかどうかは今後空港舗装材料としての要求性能を明確にした上で最終的に判断する必要があると考えている。

(2003年11月17日受付)

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，84p，1992。
- 2) 国土交通省航空局（監）：空港土木工事共通仕様書，（財）港湾空港建設技術サービスセンター，2001。
- 3) (社) 日本道路協会：舗装試験法便覧，1069p，1979。
- 4) (社) 日本道路協会：舗装試験法便覧別冊，pp.20-29，1996。
- 5) 丸山暉彦，渡辺 隆，吉原一彦：アスファルト混合物の疲労破壊包絡線，土木学会論文報告集，306号，pp.71-78，1981。
- 6) 姫野賢治，丸山暉彦，渡辺 隆，吉原一彦：低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究，土木学会論文報告集，第366号/V4，pp.143-151，1986。

- 7) 野村健一郎, 丸山暉彦, 高橋光彦: アスファルトの劣化促進方法に関する研究, 土木学会, 舗装工学論文集, 第1巻, pp.223-230, 1996.
- 8) 高橋 修, 八谷好高: 組成が異なる再生用添加剤を用いた再生アスファルト混合物の特性, 土木学会, 舗装工学論文集, 第5巻, pp.23-30, 2000.