

改質アスファルト混合物の再生利用に関する検討

秋葉國造¹・井上武美²

¹正会員 日本舗道株式会社技術研究所部長 (〒140 東京都品川区東品川3丁目32-34)

²正会員 工博 日本舗道株式会社技術研究所長 (同)

改質アスファルト混合物の再生(再生, 再々生)の方法についてはまだ十分に解明し尽くされておらず, 「プラント再生舗装技術指針」においても今後の検討課題になっている。筆者らは, 改質アスファルト混合物の再生の方法を確立するためバインダーとアスファルト混合物を並行して劣化と再生を行い, 米国の SHRP (Strategic Highway Research Program) で用いられた手法を利用して, アスファルト混合物の特性の変化を調べた。

この関係から, 再生を難しくしている改質アスファルトの特微的な変化が, バインダー中の分子サイズ分布に現れること, この変化が改質材に起因することを見だし, 繰り返し再生するために必要なバインダーの条件を示した。また, この結果から新規アスファルト混合物の混合による改質アスファルト混合物の再生の方法を示した。

Key Words: *modified asphalt, recycling, aging, complex modulus, giratory compactor, wheel-tracking test, MSD (Molecular Size Distribution), LMS (Large Molecular Size)*

1. はじめに

近年の交通量の増大にともない, 舗装技術の一層の向上がはかられている。特に道路の耐久性能の進歩はめざましい。

耐久性向上には改質アスファルトの使用が効果的で, 事実その需要は年々増大しており, 舗装用アスファルトに占める改質アスファルトの割合は, 昭和58年度の2.7%から平成6年度には5.4%にまで伸びている。

今後も, 平成4年に策定された第11次道路整備5カ年計画に見られる「ゆとり社会」の実現のため, 活力ある地域集積圏の形成, 交通ネットワークの充実をめざし, 高規格幹線道路を始めとする高品位道路の充実が推進されるに伴い, 改質アスファルト舗装の重要性は高まり, その使用量は増していくと考えられる。

一方, 補修に伴って発生する舗装発生材の再生利用は昭和50年頃に始まり, 再生加熱アスファルト混合物の全アスファルト混合物生産量に対する比率は, 昭和56年以降年々1%弱増加し, 平成3年リサイクル法の施行の年には10%を越え, 平成6年では25%にまで達している。

さて, 「プラント再生舗装技術指針」¹⁾では, 再々生混合物の品質確保と改質アスファルト混合物の再生を今後の課題としている。これは加熱アスファルト混合物の繰り返し再生が, ストレートアスファルト使用の混合物では可能だが, 改質アスファルト混合物では難しいとされているためである。

改質アスファルト混合物は, それがもつ優れた特性を維持しつつ再生されることが好ましい。

再生におけるストレートアスファルト混合物と改質ア

スファルト混合物の特性の相違を明らかにするため, ストレートアスファルト, 改質アスファルトおよび改質アスファルト混合物の繰り返し劣化と再生を行い, 力学的性質と化学的物性の相違を比較し, 再生の可否を判定するバインダーの特性の一つを見だし, これに基づいて改質アスファルト混合物をその特性を生かして繰り返し再生するために必要な条件を示した。

また, この知見から新規改質アスファルト混合物の補足により再生改質アスファルト混合物とする方法の検討を行い, 必要な新規改質アスファルトの混合率を求めた。

なお, 本論文の図表では, ストレートアスファルト, 改質アスファルトをそれぞれストアス, 改質アスと略記した。

2. 研究の背景および目的

(1) 改質アスファルトの現状

改質アスファルトはベースとなるストレートアスファルトに, 改質材としてポリエチレン (PE), ポリプロピレン (PP), スチレンブタジエン共重合体 (SBR), スチレンブタジエンブロック共重合体 (SBS), スチレンイソブレンブロック共重合体 (SIS), エチレン酢酸ビニル共重合体 (EVA), エチレンエチルアクリレート共重合体 (EEA) 等のゴムや熱可塑性エラストマーを固形分換算で3~10%添加して舗装の耐流動性を改善したバインダーである。改質アスファルトⅡ型は「アスファルト舗装要綱」²⁾に示されている標準性状ばかりでなく, 製造, 舗設作業時における作業性を維持しつつ, 供用時における耐流動性, 耐ひび割れ性もあわせ持つことが重要であ

る。

これらの特性は、作業性についてはバインダーの180℃における粘度(180℃粘度)により、耐流動性についてはバインダーの60℃における粘度(60℃粘度)や当該バインダーを用いたアスファルト混合物についてのホイールトラッキング試験により評価される。

180℃粘度は舗設作業上500 cP(centi poise)以下であることが必要である。また、60℃粘度は高いほど良く、改質アスファルトでは10 000~500 000 P(poise)であって、ホイールトラッキング試験の動的安定度は3 000回/mm以上が望ましいとされている。

上記の改質材の添加は、これらの特性を付与するためであるが、PE、PP、EVA、EEAは、耐ひび割れ性が不十分であり、また、アスファルトとの相溶性が良くないと言う欠点がみられた。このため、改質材としてSBRが多用され、3~6%を添加したものが、主に改質Ⅰ型アスファルトに利用されてきた。

しかしSBRは、60℃粘度をあげるために添加量を増すと、180℃粘度も上昇させて作業性を阻害するという特性上の難点が見られる。

耐流動性に対する要請に対して開発された改質材のSBS³⁾は、分子構造上高温における粘度を低く抑え、作業性を損なわずに添加量を10%程度まで加えることが出来る特性があるので改質Ⅱ型アスファルトとして利用されてきた。

このような経緯から、現在、改質材の主流はSBSとなっており本研究もSBSで検討を行っている。

(2) 舗装発生材のリサイクルにおける問題点

リサイクルに伴って生ずる技術的諸問題は、劣化バインダーの再生についての観点から論議されてきている。

これは、施工・供用に伴い劣化したバインダーが、繰り返し再生利用してもなおかつ、新材同等の特性を有する再生が可能かどうかという問題である。

この問題は、再生利用される発生材の種類および再生利用する形態によって、次のように細分化される。

- ①ストレートアスファルトを使用した舗装塊から製造したアスファルト再生骨材を再生アスファルト混合物に利用
- ②ストレートアスファルトを使用した舗装塊から製造したアスファルト再生骨材を再生改質アスファルト混合物に利用
- ③改質アスファルトを使用した舗装塊から製造したアスファルト再生骨材を再生改質アスファルト混合物に利用

①については、寺田ら⁴⁾の室内実験、栗山らの試験舗装結果の報告⁵⁾より、概ね繰り返し再生利用は可能とさ

れている。

②は、①が可能なアスファルト再生骨材であれば、再生時に更に改質材を加えることで再生改質アスファルト混合物とすることが出来る。

主にアスファルト再生骨材に新規改質アスファルト混合物を補足して物性の変化を追跡する検討^{6),7)}が報告されている。

③は、バインダーについての繰り返し劣化と再生の検討⁸⁾例が報告されているに過ぎない。

改質アスファルト舗装発生材の再生改質アスファルト混合物への再生は

- ・改質材が蓄積するため、改質アスファルト混合物の繰り返し再生は出来ない。
- ・発生材の旧アスファルトの性状が正確に把握できないので、繰り返し再生は理論的に可能であっても配合設計が出来ない。

との指摘もあって、「プラント再生舗装技術指針」でも今後の課題としている。

しかし、改質アスファルト舗装の再生利用は避けられない課題であるため、筆者らは改質アスファルト舗装の繰り返し再生利用の可否、不可能の場合にはその理由、そして再生利用が可能のために必要な再生の方法として新規改質アスファルト混合物の併用条件を明らかにすることを目的として研究した。

なお、この研究の結果から、再生可能な改質アスファルトおよび舗装材を開発することも以降の研究の目標に据えている。

3. 研究の方法

(1) 実験の方針

アスファルト混合物は、体積の約85%を占める骨材と約10%の体積を占めるバインダーよりなる。

このうち施工・供用・再生のサイクルにおいて劣化等の変化を受けるほとんどは、バインダーの化学的性質である。

従って、劣化と再生の過程において、アスファルト混合物中のバインダーの化学的特性を測り、アスファルト混合物の性能と対比することで、繰り返し劣化と再生の可否およびその理由のかなりの部分が明らかになると考えた。

そこで実験室内において、ストレートアスファルト、改質アスファルト単体、および同一バインダーを用いたアスファルト混合物を、並行して繰り返し劣化と再生を行った。

ここで各々の劣化は、バインダーの高速液体クロマトグラフ分析(以下、HP-GPCと称す)の分子サイズ分布(Molecular Size Distribution, MSD)が同一となってい

表-1 実験項目

		改質アスファルト	ストレートアスファルト (比較)	改質アスファルト混合物		
		30		第1回	第2回	
劣化	劣化目標	発生材平均針入度		バインダーと等価 ⁽¹⁾		
	劣化条件	200℃、36時間		180℃、6時間		
再生	再生目標 再生添加剤 改質材	針入度70まで回復 動的安定度を回復	○ ○	○ ⁽²⁾ ○ ⁽²⁾	○ ⁽²⁾ ○ ⁽²⁾	
	再生条件	再生添加剤添加量 9% 改質材添加量 1.7%	○ ○	○ ○	○ ○	
	再生対象	バインダー-全量 再生寄与量	○ -	○ -	- ○	
	繰り返し回数		3回	3回	3回	5回
評価 項目	バインダー	粘弾性(損失弾性率、貯蔵弾性率 位相角) HP-GPC (D ₂₅ 、D ₂₀) 粘度(60℃、180℃)	○ ○ ⁽⁴⁾ ○	○ ○ ○	○ ⁽³⁾ ○ ⁽³⁾ ○ ⁽³⁾	- - -
	アスファルト 混合物	ジャイレトリー試験 ホイールトラック試験 マーシャル試験 カンタブロ試験	- - - -	- - - -	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○

(注) (1)アスファルト混合物中のバインダーの劣化状態が改質アスファルトの劣化と同等になること。

(2)改質アスファルトで決めた添加量

(3)抽出バインダーについて実施。

(4)改質材量についても測定

れば、両者の劣化レベルが同一であるとみなした。そして、アスファルト混合物の力学的性質とバインダーの化学的变化を測定し、これらを対比する方法をとることとした⁹⁾。

(2) 実験の方法

a) 実験項目

実験方針に従い表-1の実験を行った。

バインダーについては改質アスファルト、および比較としてストレートアスファルトの劣化と再生の実験を行った。

アスファルト混合物の実験は、改質アスファルト混合物について、同一バインダー、同一配合骨材で行ったが、再生レベルを変えている。

すなわち第1回目の実験が混合物中のバインダー全量を対象として再生を行ったのに対して、第2回目では全バインダーの60%を対象として行っている(後述)。

劣化と再生は表-1に示す条件で繰り返し3または5回行った。

劣化と再生のつど、バインダーについては、一般性状、HP-GPCによる分子サイズ分布およびレオメータによる複素弾性率を測定した。また、アスファルト混合物については、マーシャル安定度試験、ジャイレトリー試験(6kgf/cm²、1.25°、150回転)、ホイールトラック試験およびカンタブロ試験を行った。

なお、本実験を通じてアスファルト混合物の劣化と再

生の処理および供試体作製の過程では骨材の粒度分布には変化がないことを仮定している。

また、実験はすべて室内で行っており、熱劣化だけで供用にとまらぬ劣化を代用している。

b) 使用材料

実験に使用した材料を表-2に示す。

使用したアスファルト混合物の種類は密粒度アスファルト混合物(13)で、最適アスファルト量は6.0%とした。改質アスファルトは市販品のものではなく、ストレートアスファルト95wt%に改質材5wt%を添加して作製した。

再生に伴うバインダー成分と配合骨材の追加においては、アスファルト量一定、骨材粒度分布一定に維持し、混合物中のバインダー物性の変化のみを観察するようにした。

c) バインダー単体の劣化と再生

バインダーの劣化と再生は次の通り行った。

- ①改質アスファルトの劣化後の平均針入度が30になるように200℃で36時間加熱劣化させた。
- ②これに再生添加剤を加え針入度を70に戻した後、所定の改質材を加えて再生した。各々の添加量は、表-1に示すとおりとした。

③①、②の操作を同一バインダーに対して3回繰り返した。

このようにして劣化と再生を行ったバインダーの特性を測り、また、これを再生改質アスファルト混合物の供

表-2 使用材料の代表的な性状と処理条件

アスファルト		再生添加剤		改質材		骨材及び粒度	
60~80ストリートアスファルト		石油系重質軽油		S B S系熱可塑性 エラストマー		硬質砂岩 密粒度(13)	
針入度(25°C)1/10mm	69	密度(15°C)g/cm ³	0.9273	密度(15°C)g/cm ³	0.93	通過質量%	
軟化点(R&B) °C	46.5	流動点 °C	-12.5	MFR(200°C、5kg)		13.2mm	100
伸度(15°C) cm	100(+)	動粘度(60°C)cSt	82.61	g/10min	15	4.75	62.5
動粘度(120°C) cSt	825			スチレン/ブタジエン比	20/80	2.36	42.5
		組成分析				600μm	27.1
		飽和分 wt%	61	MFR:Melt-Mass Flow		300	18.3
		芳香族分	35.2	Rate (ASTM D1238)		150	11.7
		レジン分	3.8			75	8.3

(注) 改質アスファルト組成：アスファルト 95wt%、改質材 5wt%

劣化条件（バインダー）：30×30cmの容器に1kgをとり200°C恒温槽で36時間劣化（各回）。

（アスファルト混合物）：ほぐした状態にて180°C恒温槽で6時間劣化（各回）。

再生条件：対象とするバインダーに対し再生添加剤9%、改質材1.7%添加（各回）。

試体の作製に用いた。

比較のためストレートアスファルトについても、同一条件での劣化と再生を行った。ただし、この場合再生時に改質材の添加は行っていない。

d) バインダーの劣化と再生の条件の決定方法

ここで劣化の評価を針入度 30 としたのは、アスファルトコンクリート再生骨材の旧アスファルトの平均がこの付近にあること¹⁰⁾による。また、再生添加剤は、再生アスファルトの針入度が新規アスファルトと同等となる添加量とした。

改質材は劣化に伴って減少する（図-10 後掲）が、その補足量を減少分とすると、消失した改質材とアスファルトとの反応で生ずる生成物と考えられるものの影響で混合物の力学的特性が大きく変わる。

このため、新規改質アスファルト混合物と同等のホイールトラック試験の動的安定度となる様、改質材添加量を変えて検討した結果、1.7%と決めた。

e) アスファルト混合物の劣化と再生

アスファルト混合物の劣化と再生は次の通り行った。なお、バインダーは劣化レベルとの整合性を確認するため、各々の劣化と再生の段階でアスファルト混合物の一部を採取し、バインダーを抽出した。

- ①同一の改質アスファルトを用いて改質アスファルト混合物を作製し、180°C・6時間劣化後、供試体を作製し、アスファルト混合物特性を測定した。
- ②測定後の供試体をほぐした後、改質アスファルトと同じ再生条件で再生添加剤と改質材を添加し、供試体を作製し、再生改質アスファルト混合物の特性を測定した。
- ③この供試体をほぐして第2回目の劣化を行った。

- ④この操作を同一再生改質アスファルト混合物について3回繰り返した。

なお再生のつど、添加した再生添加剤と改質材の増加に見合うアスファルト量の増加が生ずるため、最適アスファルト量を維持するに必要な同一配合の骨材を補足した。劣化と再生に伴い、実験試料の重量が増加する結果となったが劣化と再生に大きな影響を及ぼしていないと判断した。

4. 結果および考察

(1) バインダー単体とアスファルト混合物の劣化レベルの比較

図-1 は劣化と再生ごとのバインダー単体と抽出バインダーのスチレン換算分子量 6 000 以上の成分比 (D₂₉ で表す。後述) である。図には、ストレートアスファルトについて D₂₉ の推移も併記した。

バインダー単体およびアスファルト混合物からの抽出バインダーの D₂₉ がほぼ同じであることから、劣化と再生のレベルは、バインダーおよび混合物ともほぼ同一と見なしうる。

また、劣化にともなって D₂₉ が増加し、劣化が分子サイズの変化に現れていることがわかる。

(2) 劣化と再生にともなうアスファルト混合物の挙動

a) 劣化と再生における繰り返し締固め操作とバインダーの過剰

劣化と再生を行った改質アスファルト混合物のホイールトラック試験の動的安定度とジャイレトリ試験締固め度の関係を図-2 に示す。

表-3 バインダーの劣化とアスファルト混合物の劣化との物性上の対応関係

番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
試料	新規改質アスファルト	バインダー第3回再生品	第3回再生アスコン抽出アス	No. 2 + 再生剤溶液17%
針入度	51	77	184	176
軟化点 °C	65.6	78.4	47.5	55.4
伸度(15°C)cm	93	23	21.5	15.5
粘度(60°C)kP	10.7	1190	2	21
粘度(180°C)cP	200	1000	200	300
備考	再生剤溶液 再生添加剤:改質材=9:1.7混合液(再生時の添加比率)			

料 No.2) に、再生添加剤と改質材を再生時の添加比率で加えていくと両者の合計（以下再生剤溶液という）が17%（試料 No.4）に達したところで第3回再生アスコン抽出バインダー（試料 No.3）の性状とほぼ等しくなる。すなわち、アスファルト混合物では第3回再生時点で再生剤溶液が17%分だけ過剰であった。

これはバインダー単体の再生では全体が均一に再生されるが、アスファルト混合物の場合、バインダーの一部が骨材の凹凸部の表面および内部に取り込まれて再生に与らないためと考えられる。

アスファルト混合物ではバインダーの一部が再生に与らないものと仮定すると、本実験における再生剤溶液の濃度は実験のそれぞれの段階で、以下のように表される。

バインダーを再生後、再生剤を追加したときの再生剤濃度 C_b は、

$$C_b = \frac{(1+a)^n(1+z)-1}{(1+a)^n(1+z)} \quad (1)$$

アスコンをバインダー全量に対して再生したときの再生剤濃度 C_a は、

$$C_a = \frac{(1+a)^n-1}{(1+a)^n-a} \quad (2)$$

ここに、

- a : 1回の再生に必要な再生剤の量 (=10.7%)
- n : 再生回数 (=3回)
- α : アスコン上で再生に寄与しないバインダーの割合
- z : 比較のために追加した再生剤の量 (=17%)

いま、(1)=(2) において各々の値を代入すると、 $\alpha = 39.3\%$ という値が得られる。

すなわち、再生に与るバインダーはおおよそ60%であ

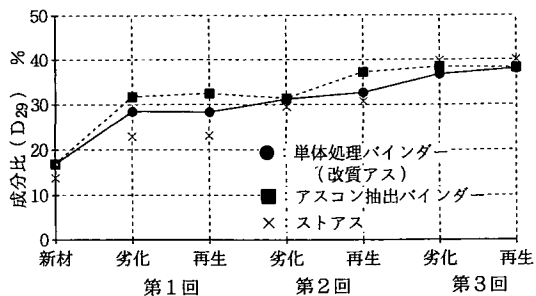


図-1 劣化に伴うバインダーの成分変化

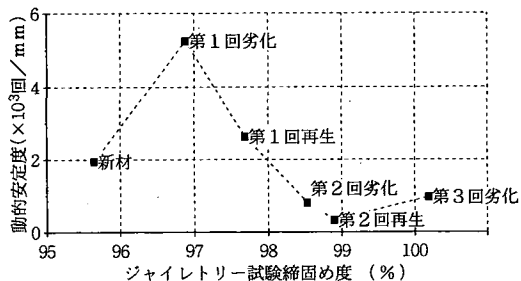


図-2 動的安定度とジャイレトリー試験締固め度

新規アスファルト混合物の劣化と再生に伴って締固め度は上昇するが、第2回劣化以降の動的安定度は、ジャイレトリー試験締固め度が98.5%に達して有効空隙率がほとんどなくなり、急激に低下している。

これは、見かけのバインダー量の過剰のためと見なせる。

通常、バインダー量の過剰は密度の低下を招くが、本実験では密度の増加を伴っており、マーシャル試験で見られるものとは異なった現象である。

なお、再生の評価用に作製したマーシャル試験、ホイールトラッキング試験用の供試体密度も、ジャイレトリー試験と同様に、それぞれほぼ同じ傾向で増加し、山田¹¹⁾が指摘した再生混合物の締固め密度に起こる現象がここでもみられた。

b) 再生に与る有効なバインダー量の推定

この再生混合物で見られる見かけのバインダー量の過剰が、再生添加剤の過剰添加によってバインダーの粘度が予定した値よりも低下し、混合物がより締固め易くなったためと考えた。

すなわち、再生添加剤はアスファルト混合物のアスファルト量に対して加えているが、バインダーの一部が再生に与らないとすれば、加えられた再生添加剤の量は過剰となり、結果としてバインダーの粘度は低下する。

そこで、再生に与る有効なバインダーの量（以下、有効バインダー量という）があるとの考えをとり、その比率の推定を行った。

すなわち、バインダー単体の第3回再生品（表-3、試

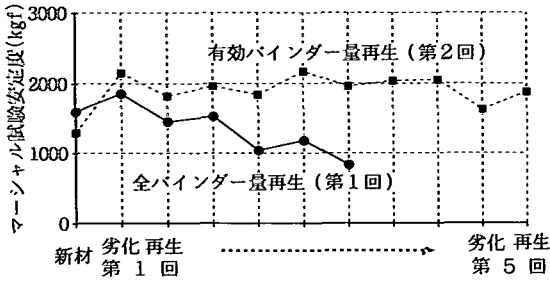


図-3 マーシャル試験安定度の推移

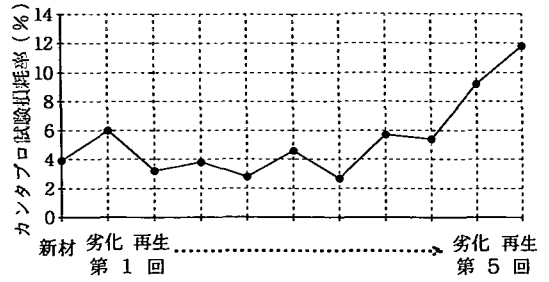


図-5 カンタプロ試験損耗率の推移

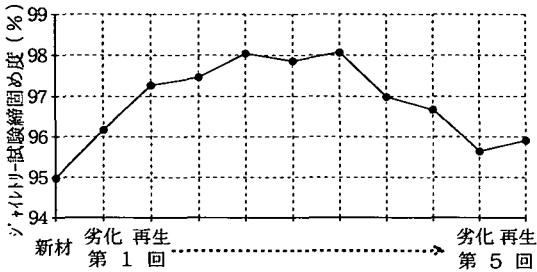


図-4 ジャイレトリ-試験締固め度の推移
(有効バインダー量で再生)

(3) 劣化と再生にともなうバインダーの物性と改質アスファルト混合物性状との関係

a) バインダー物性から見た再生限度

改質アスファルト混合物については、劣化と再生の過程において、少なくとも第4回劣化の段階から締固め不良の現象がみられる。

この間のバインダーの一般性状を表-4に示したが、第3回劣化の段階で60℃粘度・180℃粘度が極端に上昇し、再生しても180℃粘度が下がっていない。

このことは、改質アスファルト混合物の場合も第3回劣化の段階で締固めに既に問題が生じ始めているものと考えられる。

b) バインダーのレオロジー的性質とアスファルト混合物の性能

バインダーのレオロジー特性は、繰り返し応力下で変形するアスファルト混合物の流動特性の特徴を捉えやすいために、劣化と再生にともなう改質アスファルトおよび並行して行ったストレートアスファルトの貯蔵弾性率、損失弾性率¹²⁾の推移を求めた結果が図-6である。測定条件の70℃・0.2rad/秒は夏場の舗装体最高温度付近で、かつ静止荷重に近い、いわば舗装体にとって最も厳しい条件であるが、改質アスファルトの貯蔵弾性率は劣化に伴って上昇し、再生によっても下がらない。この推移はストレートアスファルトと比べると顕著な違いを示している。

劣化レベルや再生添加剤と改質材の添加量が異なるバインダーを用いたアスファルト混合物のホイールトラッキング試験の動的安定度を測定し、これと相関の良い複素弾性率の条件を、温度を30℃、50℃、70℃の3条件で、周波数を0.1～500rad/秒の間で調べた結果、70℃・10rad/秒における貯蔵弾性率との良い相関関係が図-7に示す通りにみられた。

この温度条件・周波数条件が特に相関がよいのは、これがホイールトラッキング試験の測定条件に近いと思われる。

また、改質アスファルトの再生時に添加した改質材量をホイールトラッキング試験を介して求めた(3.(2)d)参照)が、この関係から、バインダーをレオロジー特性

る。

図-3は、改質アスファルト混合物の劣化と再生において全バインダー量(表-1の改質アスファルト混合物の第1回の実験に相当)と有効バインダー量(表-1の改質アスファルト混合物の第2回の実験に相当)による再生を行った例である。

全バインダー量の再生では、劣化と再生に伴いマーシャル安定度が低下するのに対して、有効バインダー量の再生では2000kgfでほぼ一定であり、室内検討での再生においては有効バインダー量で検討することが適切であることを示している。

従って以下の検討では、改質アスファルト混合物は有効バインダー量で再生することとした。

c) 有効バインダー量での再生における改質アスファルト混合物の性質と再生限度

改質アスファルト混合物の劣化と再生において、この有効バインダー量での再生を行ったときのジャイレトリ-試験締固め度およびカンタプロ試験損耗率の推移を図-4と図-5に示す。

本実験ではカンタプロ試験およびマーシャル試験供試体作製の温度とジャイレトリ-締固め温度を160℃に維持した。

図-4、図-5では、第4回劣化の時点でジャイレトリ-試験締固め度の低下とカンタプロ試験損耗率の増加が始まっている。この現象は、既にこの段階で、再生しても締固め不良が回復しないほどに劣化が進んでいることを示している。

表-4 バインダー劣化と再生に伴う性状変化

番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
試料	新規改質 アスファルト	第1回 劣化品	第1回 再生品	第2回 劣化品	第2回 再生品	第3回 劣化品	第3回 再生品
針入度	51	31	66	58	84	62	77
軟化点 °C	65.6	63.8	59.0	65.5	65.8	80.1	78.4
伸度(15°C)cm	93	32.0	39.0	34.7	29.3	24.0	23.0
粘度(60°C)kP	10.7	39.1	10.6	90.9	42.3	2410	1190
粘度(180°C)cP	200	400	400	500	500	1300	1000
D ₂₅ %	0.37	5.49	5.64	8.34	10.0	13.4	14.6

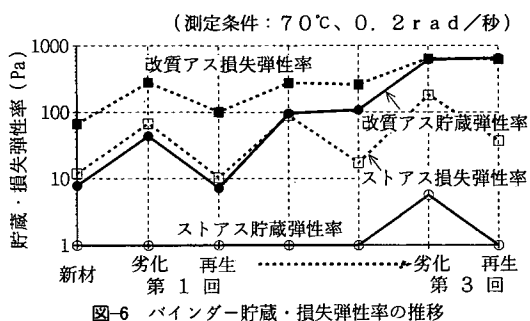


図-6 バインダー貯蔵・損失弾性率の推移

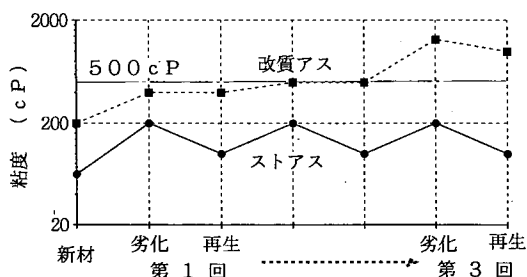


図-8 劣化・再生バインダー 180°C 粘度の推移

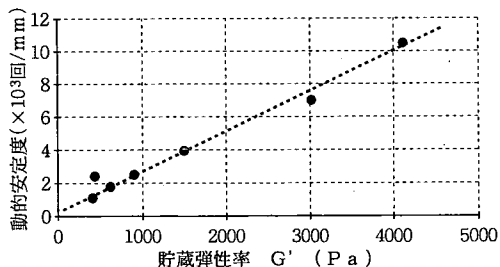


図-7 ホイルラッキング試験動的安定度と貯蔵弾性率 (貯蔵弾性率測定条件: 70°C, 10rad/秒)

で捕らえる SHRP の考えからすると妥当性もあるといえる。

c) 改質アスファルトとストレートアスファルトの物性の相違と分子サイズ分布

改質アスファルト混合物は3回の再生で作業性に支障が見られるものの、ストレートアスファルト混合物では繰り返し再生利用が可能である。

この両者の違いを明らかにするため、並行してストレートアスファルトでのブランクテストを行った結果を図-8に、180°C 粘度の推移で示した。ストレートアスファルトは再生のつど粘度が劣化前のレベルまで回復するのに対して、改質アスファルトは再生しても粘度の低下がみられず、第3回劣化の段階では粘度の値が、作業性の限界と見られる500cPを越える。同様の傾向は図-6の貯蔵弾性率にもみられる。

なおここでいう巨大分子は、Jenningsらが分子サイズの分布曲線を3分割して定義した、LMS (巨大分子サイズ量) の概念を用いている。Jenningsらはこれを劣化・ひび割れと関連させて広汎な研究を行っている^{13), 14)}。

LMSには厳密な定義はなく「標準的なアスファルトで定義した量を基準とした相対的な値」¹⁵⁾ と考えるべきである。前掲の図-1ではJenningsらが用いたLMSとはほぼ同じ区分で分割して求めた値を用いている。

新規および第3回劣化後の改質アスファルトの分子サイズ分布を求めた結果を図-9に示す。

比較のために、同じく劣化前後のストレートアスファルトの分子サイズ分布も併記した。図から劣化後の改質アスファルトにはストレートアスファルトにも新規改質アスファルトにも見られない分布曲線のピークが保持時間25分以前のところにみられる。

HP-GPCでは、サイズの大きい分子が先に溶出し、その保持時間が短い。

従って、SBS系改質材を用いた改質アスファルトが劣化するとストレートアスファルトでは生成しない巨大分子が生成し、これが強固な網目構造を形成するために再生不能な粘度の上昇が起きると推察される。

劣化した改質アスファルトでは巨大分子が生成していると考えられる根拠は次の4点である。

- ①改質材が減少している (図-10)。
- ②保持時間25分~29分の溶出分が、劣化したスト

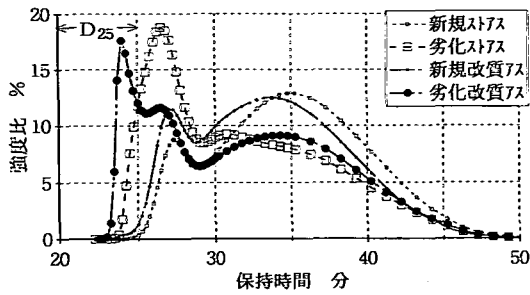


図-9 3回劣化後のバインダー分子サイズ分布

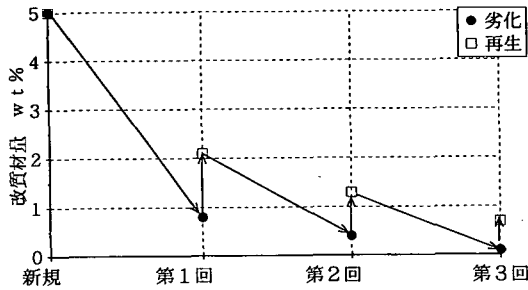


図-10 劣化と再生に伴う改質材量の推移

レートアスファルトに比べて、面積比で約10%少ない(図-9参照)。

③劣化したストレートアスファルトに比べて少なくなっている分、保持時間25分以下の物質が生成している(図-9参照)。この生成した物質は、ポリスチレン換算分子量で22000以上であり、添加した改質材は平均分子量12万であり、いずれも保持時間25分以内に溶出する。ただし、図-9では溶出分の検出にUV(紫外線)を用いているので改質材単体では感知されていない。

④従って、保持時間25分以内に溶出した物質のうち、劣化した改質アスファルトでは生成し、劣化したストレートアスファルトでは生成していない物質は、改質材がアスファルテン分子と反応して巨大分子となり、HP-GPCの D_{25} 溶出分として溶出し、しかも、反応した分子中のアスファルテン部分がUVによって検出されたと考えることが妥当である。

(4) バインダーのレオロジー的性質と巨大分子サイズ量

ここで巨大分子サイズ量の多寡がバインダーのレオロジー的性質にどのような影響を与えるか考察した。

実験に用いたHP-GPCの測定条件¹⁰⁾において、保持時間25分までに溶出する量(図-9において矢印で示した部分の全体に対する面積比)を D_{25} で表すと、 D_{25} は図-11に示すように変化する(なお、JenningsらのLMSに相当する量は D_{29} である)。

図-11には、ストレートアスファルトの場合も併記し

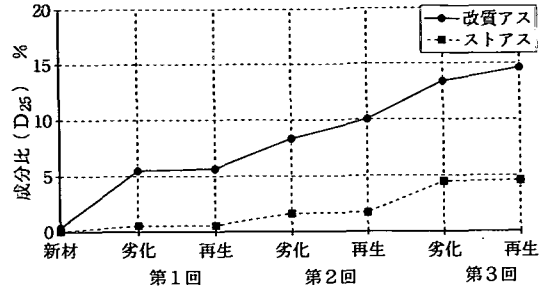


図-11 劣化に伴う D_{25} の変化

た。改質アスファルトの劣化に伴う D_{25} の増加量がストレートアスファルトに比べ非常に大きい。

一方、図-1に示したごとく両者の D_{29} は劣化が進むとほぼ同水準になる。

これらの結果から、 D_{25} に含まれる成分物質が加熱アスファルト混合物の作業性を阻害していることが推定される。

そこで D_{25} とアスファルトの粘弾性の関係を見ると、図-12のごとく D_{25} はアスファルトの種類および劣化レベルの如何に拘わらず、損失弾性率と貯蔵弾性率の比で求められる位相角 δ と良い相関を示している。

図から、繰り返し再生の可能なストレートアスファルトは座標上の左・上方に位置しているのに対し、改質アスファルトは劣化回数と共に右下方に移っている。

加熱アスファルト混合物の作業性が悪くなる第3回劣化後の改質アスファルトでは、 D_{25} は13%、位相角は46度となる。

この結果、再々生可能な改質アスファルトとは、劣化を繰り返し行っても位相角が50度以下にならず、 D_{25} が10%を越えないものと考えられる。

5. 新規改質アスファルトによる再生方法

(1) 目的および方法

既述の実験で明らかになったことであるが、改質アスファルトは繰り返しの熱劣化と再生に伴って徐々にバインダーの劣化が進行し、ついには通常の舗設温度条件では混合物の締固めが不良となる。

この劣化状態では既にバインダーの針入度と180℃粘度のバランスが崩れており、再生添加剤による再生は不能である(表-4)。

再生が不能となる前の状態の改質アスファルトに新規改質アスファルトを加え、この混合アスファルトが供用後も同じ方法で再生することが出来るように新規改質アスファルトの混合比率を求める実験を、前述と同様にバインダーの劣化、アスファルト混合物の劣化の二つの方法で行った。

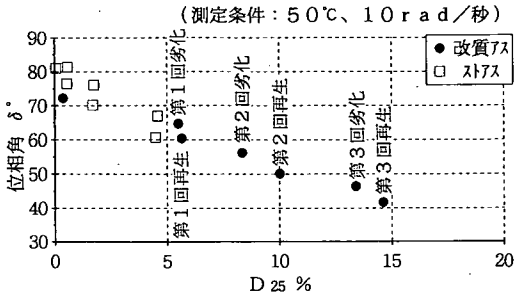


図-12 巨大分子サイズ量 D_{25} とアスファルトの位相角の関係

バインダーの劣化については3.(2)c)項に示す方法で3回目まで劣化させたバインダーに新規バインダーを20~40%添加して、バインダー物性を測定すると同時に、このバインダーを用いた改質アスファルト混合物を作製してその特性を検討した。

改質アスファルト混合物の劣化については、適切な劣化状態といえる改質アスファルト混合物をジャイレトリ試験締固め度でみると第2回劣化と第3回劣化の間に差がなく、回復の有無の確認が困難なため(図-4参照)第4回まで劣化したアスファルト混合物とした。従って、3.(2)e)項①~③に示す方法で4回目まで劣化させたアスファルト混合物に新規アスファルト混合物を10~40%添加してその特性を検討した。

(2) バインダーによる最少混合量の検討

バインダー第3回劣化品に新規改質アスファルトを混合率を変えて加えたときの位相角との関係を図-13に示した。

新規改質アスファルト40%の混合で位相角10度の回復が見られる。位相角は1回の劣化で10度低下する(図-12参照)ので、新規改質アスファルト40%の混合は1回の劣化と再生を受けないことに相当すると見なすことができる。

図-14は新規および第3回劣化改質アスファルトを各種混合比率で調製し、これを用いて作製したアスファルト混合物のジャイレトリ試験締固め度試験の結果である。新規改質アスファルトの20~30%添加で締固め度はほぼ回復することから、改質アスファルト混合物として再生されていることがわかる。

(3) アスファルト混合物による最少混合量の検討

検討した第4回劣化アスファルト混合物は、既に過度の劣化を起こしており、これに新規改質アスファルト混合物を混合して再生しても物性の絶対値より、むしろ回復の程度の把握ということになる。

図-15に新規改質アスファルト混合物の混合率とジャイレトリ試験締固め度、カンタブロ試験損耗率の関係

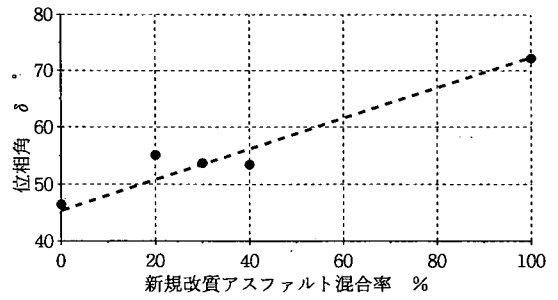


図-13 新規改質アスファルト混合率と位相角の関係

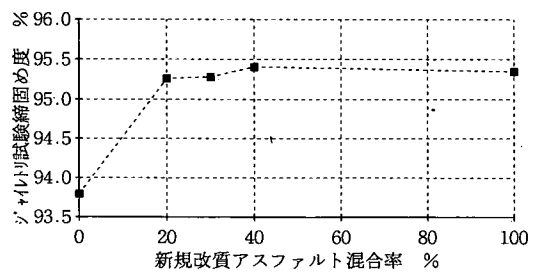


図-14 新規改質アスファルト混合率と締固め度

を示す。

ジャイレトリ試験締固め度は新規改質アスファルト混合物を約30%混合することで締固め度1%の回復を示している。図-4から1回の劣化と再生で約1%の締固め度が低下していることを考慮すると、新規改質アスファルト混合物の混合が有効となるのは30%以上と推測される。

これは D_{25} の量、すなわち約30%の新規改質アスファルトの混合で第3回劣化バインダーを第2回劣化レベルまで戻しうることからも推測される。

なお、再生アスファルト混合物としてみると空隙率の結果から新材の混入率は40%以上となる。

(4) 新規改質アスファルトおよび混合物の混合率に関する考察

以上、改質アスファルト混合物の発生材を再生改質アスファルト混合物として繰り返し再利用する前提でその混入率をどこまで上げられるかを、締固め度を指標として室内実験で捉えた結果、現状の改質材では、少なくとも40%の新材を加えなければ繰り返し再生利用ができないことを示した。

この結果は以下の既往検討結果の50~70%の結論より低くなっているが、劣化した混合物の現場と室内の相違が原因となっていると考えられる。

一般アスファルト混合物について栗山ら⁹⁾は、名古屋市における再生加熱アスファルト混合物舗装の追跡調査、およびこの劣化したものの再生加熱アスファルト混

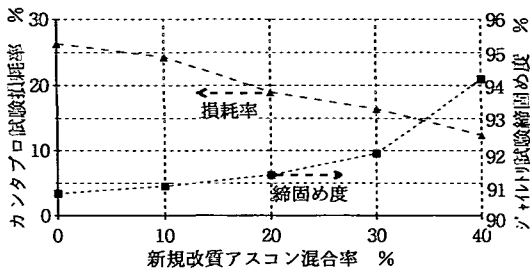


図-15 新規改質アスコン混合率と縮固め度、カンタプロ試験損耗率

合物で作製した再生アスファルト混合物の供試体の試験から、少なくとも50%の混入率での繰り返し再利用は可能としている。

岡本⁷⁾は三重県で行った一般発生材の混入率30%の重交通再生改質アスファルト混合物の試験舗装において、良好な性能を確認している。

武友⁸⁾は、新材と発生材を同時に改質する再生混合物用改質アスファルトを用いて発生材の混入率30%の重交通道路の試験舗装を行い、6ヶ月後であるが良好な性能を示すと報告している。

栗谷川¹⁷⁾は室内実験において、改質アスファルト混合物の発生材混入率50%の混合物は、ストレートアスファルト混合物の発生材50%混入の再生アスファルト混合物と同等の物性を示すとしている。

これらは、いずれも現在の発生材の発生状況から混入率を定め、その混入率での再生混合物の性能を確認するという手法を用いており、実用面を重視している。

また、鈴木⁸⁾は改質アスファルト混合物の発生材を用いた検討を行い、改質アスファルト混合物の発生材は、ストレートアスファルト同等の針入度と軟化点に再生することが難しいこと、混入率が増すに従って疲労耐久性の低下があること等の知見を指摘した上で、新材と同程度の混合物性状に止めるためには、発生材の混入率は30%であると報告している。

6. まとめと今後の課題

- 1) 改質アスファルトの劣化は再生によって回復しない物性があり、ストレートアスファルトとは根本的に異なった挙動を示す。
- 2) 改質アスファルトが劣化すると、改質材とアスファルトが反応して再生しにくい物質を生成する。
- 3) バインダーの劣化はHP-GPC D_{25} の増加を伴っており、再生可能であるためには D_{25} が一定量を越えないように物性を維持することが重要である。
- 4) 改質アスファルトの劣化は改質アスファルト混合物の縮固め不良、密度の低下、カンタプロ試験損耗率の

増加に表れる。

- 5) 新規、劣化、再生各々のバインダーの粘弾性特性の把握はバインダー組成やアスファルト混合物の性能等と非常に相関を示し、加熱アスファルト混合物の性能を評価する助けとなる。
- 6) SBSを改質材とした改質アスファルトを用いて繰り返し再生利用を行っていくためには、再生のつど少なくとも40%の新規改質アスファルトあるいは混合物の追加が必要となる。

室内検討でしかも熱劣化だけで劣化を扱うという限られた条件のもとではあるが改質アスファルト舗装材の問題点をバインダーとアスファルト混合物から検討した結果、以下のことを明らかにすることが出来た。

改質アスファルト混合物を再生して再生改質アスファルト混合物とするには、新規改質アスファルト、または新規改質アスファルト混合物の混合で実用上は対応できる。しかし、有効な再生利用という観点からすると、その再生率に問題がある。今後はこれらの問題点を克服し、繰り返しの劣化と再生に耐える改質材と舗装材の開発が今後の課題となる。

謝辞：本研究開始にあたりご助言戴いた土木研究所片脇新材料開発研究官、坂本室長ほか化学研究室の皆様、高速液体クロマトグラフ関係 SHRP 研究資料の提供と助言を戴いた Dr.J.A.Pribanic 氏、そして粘弾性の測定、高速液体クロマトグラフ測定について助言とご助力を戴いた日本石油(株)中央技術研究所長谷川宏氏、生明清氏、清水優氏ら関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：プラント再生舗装技術指針，1992年12月。
- 2) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1992年12月。
- 3) Shell 特許：GB1968-4176468，1969/3/19。
- 4) 寺田剛・片脇清士・坂本浩行：劣化アスファルトの再生限界に関する試験，日本道路会議論文集，19，390～391，1991。
- 5) 栗山昌人，吉兼亨，金田正秀，大河内室：「再生加熱アスファルト舗装の耐久性と再生について」，道路建設，6，3，60～66，1994。
- 6) 武友憲重，金銅隆，中市晴夫，矢島浩二：再生混合物用改質アスファルトの試験施工における評価，舗装，No.30，4，pp.18～23，1995。
- 7) 岡本一男，伊東敏之，山岡平八：再生アスファルト混合物の重交通道路への適用例，舗装，No.30，1，pp.24～29，1995。
- 8) 鈴木勲，峰岸順一，田中邦則：改質アスコン発生材の再生に関する室内試験，平成7年度東京都土木技研年報，pp.141～148，1995。
- 9) 秋葉園造，井上武美：改質アスファルト混合物の再生に関

- する検討, 第 50 回土木学会年次学術講演概要集 5, 594.
- 10) 地方公共団体建設技術試験研究機関連絡協議会アスファルト分科会: 再生アスファルト混合物の品質に関する実態調査報告書, 1989 年 2 月.
- 11) 山田優: 再生アスファルト混合物の性質と供用性に関する一研究, 土木学会論文集, No. 348, pp. 51~60, 1984 年 8 月.
- 12) 動的粘弾性測定の原因・方法については, たとえば佐々木 巖: アスファルト評価のための粘弾性理論, アスファルト, 37, 181, pp. 35~41, 1994. を参照されたい.
- 13) Jennings, P.W. and Pribanic, J.A.S: The Expanded Montana Asphalt Quality Study using High Pressure Liquid Chromatography, *FHWA/MT-85/001*, 1985.
- 14) Jennings, P.W., Pribanic, J.A., Raub, M.F., Smith, J.A. and Mendez, T.M.: Advanced High Performance Gel Permeation Chromatography Methodology, *SHRP-A-630*, 1993.
- 15) Private Letter from J.A.Pribanic, Aug.2, 1994.
- 16) カラム: 東ソー G3000H8, G2000H8 7.8mmφ×60cm, 溶媒: THF 23℃, 1.0ml/min, 検出器: UV 340nm.
- 17) 栗谷川: 改質アスファルト混合物発生材の再生利用に関する研究, 改質アスファルト, No. 1, pp. 23~29, 1993.

(1996.2.16 受付)

ON THE REPEATED RECYCLING OF THE MODIFIED ASPHALT CONCRETES

Kunizo AKIBA and Takemi INOUE

Although we all understand that modified asphalt concrete recycling will be one of the major problems we must overcome in the near future, there are few explanations why this is so difficult.

To have a clear view as to the difficulty and find the means to settle this problem, we devised a method, in which we repeatedly aged and rejuvenated modified asphalt binder as it was, along with the asphalt concrete and then compared performances of concrete with properties of cement.

In the course of this study, we found the major difficulty was caused by the chemical reaction between modifier and asphalt which eventually lead this material to the macro-molecular composition.