

繰返し再生を考慮したアスファルト混合物の 再生方法に関する研究

加納孝志¹・新田弘之²・佐々木巖³・西崎到⁴・久保和幸⁵

¹ 正会員 工修 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ舗装チーム(〒305-8615 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail : kanou@pwri.go.jp

² 正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ新材料チーム(〒305-8615 茨城県つくば市南原 1-6)

³ 正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ新材料チーム(〒305-8615 茨城県つくば市南原 1-6)

⁴ 正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ新材料チーム(〒305-8615 茨城県つくば市南原 1-6)

⁵ 正会員 工修 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ舗装チーム(〒305-8615 茨城県つくば市南原 1-6)

繰返し再生利用されることを前提としたアスファルト混合物の望ましい再生方法を提案することを目的に、市販の再生用添加剤と軟質アスファルトを用いて、劣化と再生を繰返したアスファルトの物理性状および化学性状、ならびに再生アスファルト混合物の性状の変化を確認した。その結果、再生用添加剤の種類によって再生されたアスファルトの性状は異なることが分かった。また、軟質アスファルトを用いて繰返し再生されたアスファルトは、再生用添加剤を用いた場合に比べ、物理的・化学的な性状の変化が少なく、軟質アスファルトを用いる方法は、繰返し再生を考慮した場合に適した方法である可能性が示された。

Key Words : asphalt, recycled hot mix asphalt, reclaimed asphalt pavement, aging, rejuvenator

1. はじめに

アスファルト舗装発生材のリサイクルは1980年代から本格的に行われるようになり、現在の再資源化率は99%に達している¹⁾。これに伴い、出荷されるアスファルト混合物に占める再生アスファルト混合物の割合も増加しており、1998年に50%に達して以降も増加を続け、2007年には73%を占めるようになっている²⁾³⁾。アスファルト舗装の更新周期を10年と仮定した場合、2008年以降のアスファルト舗装発生材の半分以上は、過去に一度以上再生されたことになり、今後は、複数回繰返して再生利用されたアスファルト舗装発生材が増加してゆくこととなる。

再生アスファルト混合物を製造する場合、再生骨材に含まれるアスファルト(以下、旧アスファルト)の劣化度(針入度)に応じて新アスファルトや再生用添加剤(以下、添加剤)などの補足材を加え針入度を回復させている。しかしながら、既往の研究によれば⁴⁾、添加剤を用いて繰返し再生されたアスファルトは、アスファルトの物理的・化学的性状が変化し、針入度が元に戻っても繰返し回数が増すごとに、針入度以外の指標が舗装用アスファルトの一般的性状の範囲からはずれることがあることを明らかにしている。このことから今後は、再生アス

ファルトの配合試験において、針入度以外の指標の測定、あるいは繰返し再生を考慮した添加剤の評価項目の設定などが必要と考えられる。

本文では、市販の添加剤9種類および針入度の大きなアスファルト(以下、軟質アス)を入手して、劣化と再生を繰返したアスファルトの物理・化学性状および再生アスファルト混合物の性状などから、繰返し再生利用を考慮したアスファルト混合物に対して望ましいと考えられる再生方法について検討を行った結果を報告する。

2. 試験概要

本検討では、添加剤の種類が繰返し再生されたアスファルトの性状に与える影響を確認するとともに、軟質アスを用いてアスファルトとアスファルト混合物の促進劣化と再生を繰返し、アスファルトならびにアスファルト混合物性状の物理・化学性状の変化を測定した。以下に試験概要を示す。

(1) 添加剤の種類が繰返し再生に与える影響

a) 試験手順

添加剤の種類を変化させ、アスファルトの劣化と再生を2回繰返して各劣化・再生段階においてアスファルトの物理・化学性状を確認した。試験手順を図-1に示す。

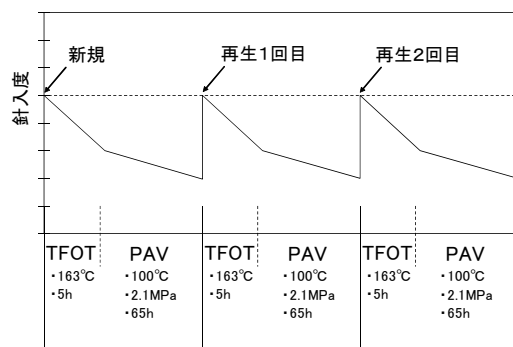


図-1 試験手順

表-1 使用したストレートアスファルトの性状

密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 15℃ cm
1.038	70	47.0	100+

表-2 使用した添加剤の性状

再生用 添加剤	60℃粘度 mm ² /s	引火点 ℃	密度 g/cm ³	薄膜加熱後 粘度比
①	81	256	0.911	未測定
②	91	232	0.966	1.22
③	210	276	0.998	1.14
④	101	248	0.981	1.24
⑤	1091	272	0.975	1.25
⑥	91	234	0.956	1.13
⑦	98	240	0.948	1.12
⑧	87	235	1.014	1.21
⑨	526	327	0.978	1.10

b) 使用材料

市販のアスファルト 1 種類(表-1)と添加剤 9 種類(表-2)を使用した。なお、アスファルトには JIS K 2207 を満足する舗装用アスファルト 60/80 を使用した。また、添加剤は国内に流通しているもので、実際にプラントで使用されているものを使用した。

c) 促進劣化方法

アスファルトの劣化試験は、舗装調査・試験法便覧⁵⁾の A046：薄膜加熱試験方法(以下、TFOT)と A059：加圧劣化試験方法(以下、PAV)により行った。ただし、PAV においては、近年、旧アスファルトの低針入度化が進んでいる現状を踏まえ、再生アスファルト混合物への利用限界である針入度 20 になる条件を予備実験より求め、試験時間を 65hr に変更して行うこととした。

d) 再生方法

促進劣化試験(TFOT+PAV)後のアスファルトは、舗装再生便覧⁶⁾の添加剤を使用する方法にしたがって再生した。ここでは、添加剤の違いが再生アスファルトの性状に与える影響をより明確にするために針入度の目標値は 70 とし、再生骨材の配合率が比較的高い場合である 60% を想定して、添加剤を含めた新アスファルトの配合率が 40% となるように再生を行った。

表-3 TLC-FID 法の概要

	概 要
吸着層	棒状薄層吸着層(担体：シリカゲル)
検出器	水素炎イオン化検出器(FID 検出器。有機成分を水素炎中で燃焼させ、発生イオン電流を検出)
操作方法	吸着層上にアスファルトをスポットした後、ヘキサン(展開距離 10cm)→トルエン(展開距離 5cm)→ジクロロメタン+メタノール混液(95:5)(展開距離 2cm)の順で展開し、4 成分に分離する。乾燥後、それぞれの濃度を FID 検出器で測定し、それぞれの濃度比を求める。

表-4 FT-IR の条件等

	条件等
吸光分析法	KB r 結晶上に、溶剤を用いて試料の薄膜を形成し透過測定
カルボニル指数 (Carbonyl Index: CI)	$CI = \frac{\log(I_{01}/I_1)}{\log(I_{02}/I_2)}$ I ₁ , I ₂ : それぞれ 1700cm ⁻¹ と 1600cm ⁻¹ 付近のピークスペクトルの透過率 I ₀₁ , I ₀₂ : それぞれ上記波数に対応するバックグラウンドの透過率

e) 試験方法

各劣化・再生段階のアスファルトについて、物理性状試験としては針入度試験、軟化点試験を⁵⁾、化学性状試験としてはアスファルト組成成分の分析、赤外吸光度測定等を行った。

ここで、アスファルト組成成分の分析には、薄層クロマトグラフ法(以下、TLC-FID 法)を用いた。この TLC-FID 法は、棒状の薄層吸着層上でアスファルトを 4 つの成分に分離(TLC の操作)し、それぞれの成分をイオン化し(FID)検出する方法を組み合わせた分析方法である。使用した溶媒などの条件を表-3 に示す。

酸化反応の進行を定量的に評価するため、赤外吸光度測定を行った。FT-IR(フーリエ変換赤外吸光度計)を用い、アスファルトの酸化劣化の指標となる酸素含有官能基(カルボニル基)増加の挙動を測定した。具体的には、アスファルトの赤外吸光度を計測し、カルボニル基伸縮振動に帰属する 1700cm⁻¹ 付近のピークと、劣化の影響を受けないとされる C=C 伸縮振動に帰属する 1600cm⁻¹ 付近のピークの比からカルボニル指数(以下、酸化度)を求めた。FT-IR の測定条件等を表-4 に示す。

(2) 繰り返し再生したアスファルトの性状

a) 試験手順

再生時の軟質アスあるいは添加剤の種類(表-5)を変化させ、劣化と再生を繰り返したアスファルトの性状を確認した。試験手順を図-2 に示す。

b) 使用材料

使用した軟化剤の一覧を表-5 に、代表的な性状項目を表-6 に示す。ここでは、一般に行われているストレート

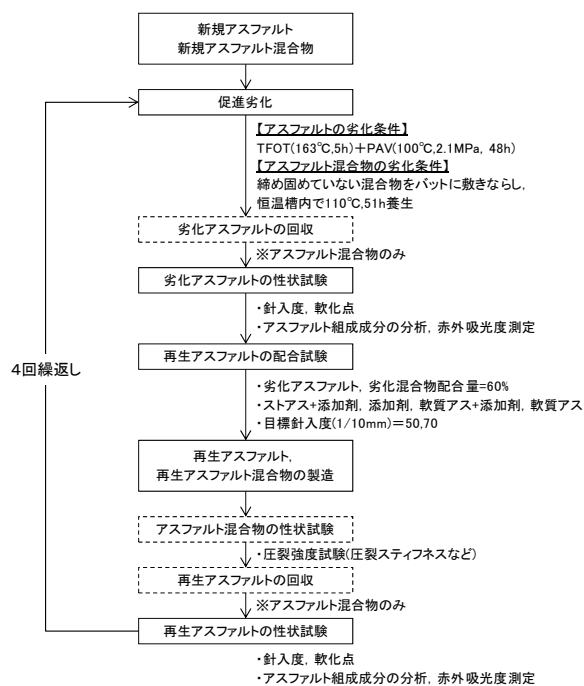


図-2 試験手順

表-5 バインダ試験に使用した軟化剤の概要

軟化剤の種類	仕様	配合
ストアス 60/80 + 添加剤②	ストアス 60/80 + オイル系再生用添加剤②	劣化アス:ストアス 60/80: 添加剤② = 60:33:7 ~ 60:21:19
添加剤②	オイル系再生用添加剤②	劣化アス: 添加剤② = 85:15 ~ 76:24
軟質アス 300/400	軟質アスファルト 300/400	劣化アス: 軟質アス 300/400 = 60:40

アスファルト 60/80(表-1)と添加剤②(表-2)を併用したもの(以下、ストアス 60/80+添加剤②)、添加剤②、軟質アス 300/400を用いた。なお、添加剤②は、比較的多くのアスファルト混合所で用いられているものとして選定した。

c) 促進劣化方法

アスファルトの劣化試験は、舗装調査・試験法便覧⁵⁾のTFOTとPAVにより行った。ただし、PAVおける加熱時間は、針入度 20 を目標として試験時間を予備実験より求め、48hrに変更して行うこととした。

d) 再生方法

促進劣化試験(TFOT+PAV)後のアスファルトは、舗装再生便覧⁶⁾の添加剤および新アスファルトを使用する方法に従い、添加剤を含めた新アスファルトの配合率は40%、目標針入度は50(1/10mm)となるように再生を行った。なお、目標針入度については、比較的多くのアスファルト混合所で再生アスファルトの目標針入度が50(1/10mm)であることを考慮して決定した。

e) 試験方法

各劣化・再生段階のアスファルトについて、物理性状試験としてアスファルトの針入度試験、軟化点試験を⁵⁾、

表-6 軟化剤の性状

材料	密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	組成分析			
			アスファル テン分	レジン 分	飽和 分	芳香 族分
添加剤②	0.966	—	—	6.3	67.1	26.6
軟質アス 300/400	1.015	395	12.3	21.6	7.3	58.8

表-7 混合物試験に使用した軟化剤の概要

軟化剤の種類	仕様	配合
軟質アス 300/400	軟質アスファルト 300/400	劣化アス:軟質アス 300/400 = 60:40
軟質アス 150/200 + 添加剤②	軟質アスファルト 150/200 + オイル系再生用添加剤②	劣化アス:軟質アス 150/200: 添加剤② = 60:37:3 ~ 60:39:1

表-8 軟質アス 150/200 の性状

材料	密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 15℃ cm
軟質アス 150/200	1.025	192	39.0	130+

化学性状試験としてはアスファルト組成成分の分析、赤外吸光度測定等を行った。

なお、組成成分の分析結果から、(1)式によりコロイドインデックス(以下、Ic)を算出し、劣化度を評価した。Ic はポリマー改質アスファルトの相溶性を評価するために用いられることも多いが、感温性が高く変形追従性に乏しい成分である飽和分(ワックス)およびアスファルテン分の構成比であることから、変形追従性や靱性の低下指標としても有効であると考えられる。本検討では、繰返し劣化再生時の有害成分蓄積量の指標として用いた。

$$Ic = \frac{\text{飽和分} + \text{アスファルテン分}}{\text{芳香族分} + \text{レジン分}} \quad \dots \quad (1)$$

(3) 繰返し再生したアスファルト混合物の性状

a) 試験手順

図-2 に示す手順にて試験を行った。

b) 使用材料

表-1 に示すアスファルトを用い、最適アスファルト量 5.5%の一般的な密粒度アスファルト混合物(13)を使用した。また、軟化剤には、表-5 に示す軟質アス 300/400 および軟質アス 150/200 と添加剤②を併用したもの(以下、軟質アス 150/200+添加剤②)を使用した。表-7 に使用した軟化剤の種類および劣化アスと軟化剤の配合を、表-8 に使用した軟質アス 150/200 の性状を示す。なお、劣化アスと軟化剤の配合割合は、再生アスファルトの配合試験により求めた。

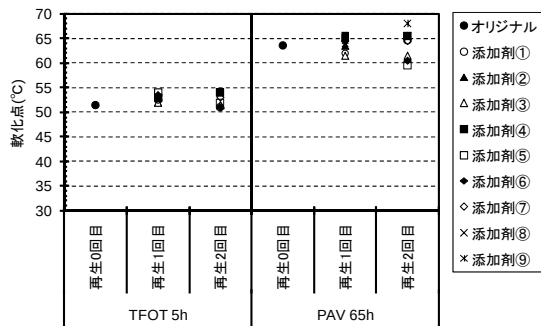


図-3 軟化点測定結果

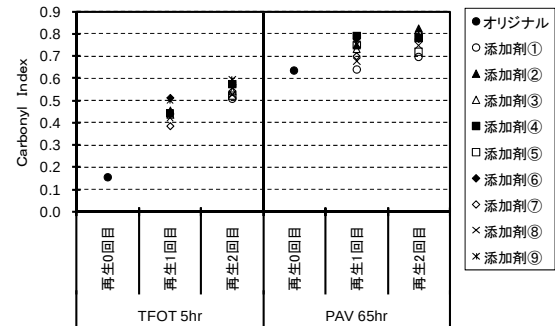


図-4 酸化度測定結果

c) 促進劣化方法

アスファルト混合物の劣化は、締め固めていない状態のアスファルト混合物 75 kgを 36×24cm のバットに敷きならし、110℃の恒温槽内で 51hr 養生して行った。なお、このときの養生時間(51hr)は劣化後の回収アスファルトの針入度が 20 となる条件とした。

d) 再生方法

劣化後のアスファルト混合物を再生骨材として用い、再生骨材配合率 60%、目標針入度 50(1/10mm)として、軟質アス 150/200+添加剤②、軟質アス 300/400 の 2 種類を用いて繰り返し 4 回再生した。

e) 試験方法

試験項目は、劣化・再生の各段階において、アスファルト混合物の物理性状試験として 20℃での圧裂試験(舗装調査・試験法便覧 B006)⁹⁾を行い、さらにアスファルト混合物より回収したアスファルトの針入度試験、軟化点試験、伸度試験⁹⁾を行った。なお、圧裂スティフネスは、圧裂強度を最大荷重時の変位量で除したものであり、アスファルト混合物のたわみ追従性を表す指標として、(2)式により算出した。

$$S = \frac{2P}{\pi dl f} \dots\dots (2)$$

ここに、S：圧裂スティフネス(MPa/mm)

P：最大荷重(N)

d：供試体の厚さ(mm)

l：供試体の直径(mm)

f：最大荷重時の変位量(mm)

3. 添加剤の種類と繰り返し再生したアスファルトの性状

添加剤の違いによる、軟化点の変化を測定した。軟化点の測定結果を図-3 に示す。図から、軟化点は添加剤の種類により差が見られ、再生 1 回目よりも再生 2 回目のばらつきが大きくなった。このことから、今後は繰り返し再生を考慮した添加剤の品質について検討する必要があると考えられる。

また、劣化における酸化等の化学的变化を見るために、

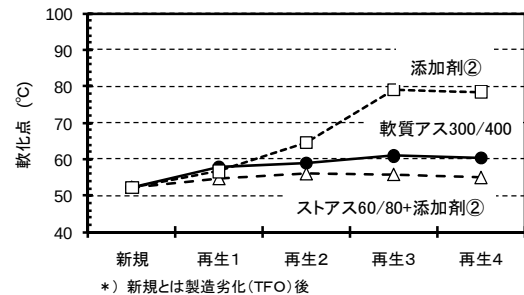


図-5 繰り返し再生による軟化点の変化

FT-IR を用いてカルボニル基の変化を測定した。測定結果を図-4 に示す。図-4 から、再生回数が多くなるにしたがってアスファルトの酸化度は大きくなる傾向が見られた。このことから、添加剤により旧アスファルトの針入度を回復させても劣化生成物がなくなるわけではなく、繰り返し再生によって酸化物は蓄積してゆくことが分かる。

4. 繰り返し再生におけるアスファルトの性状

アスファルトの物理性状として、軟化点の変化を測定した。測定結果を図-5 に示す。図-5 から、軟化点は、再生回数が多くなるにともない高くなる傾向が見られたが、軟質アス 300/400 および軟質アス 150/200+添加剤②を用いた場合は、再生を繰り返した場合でも軟化点の上昇は比較的小さく 60℃程度までであった。しかしながら、添加剤②のみで再生した場合は、再生 3 回目以降の軟化点は 80℃程度となっており、繰り返し再生によりアスファルトが硬くなっていることを示している。ポリマー等を混入しないストレート系のアスファルトの軟化点が異常に高いことは、耐流動性に優れると解釈することは困難で、変形抵抗性を失い脆化しているものと推測される。

このことから、繰り返し再生を考慮した場合には、軟質アス 300/400 もしくはストアス 60/80+添加剤②を用いて再生することが望ましいと考えられる。劣化における化学的变化を見るために、再生アスファルトの組成分析および赤外吸光度測定を行った。測定結果を図-6、図-7 に示す。図-6 から、添加剤②は再生回数が多くなるにしたがって Ic が増加する傾向が見られた。また、ストアス

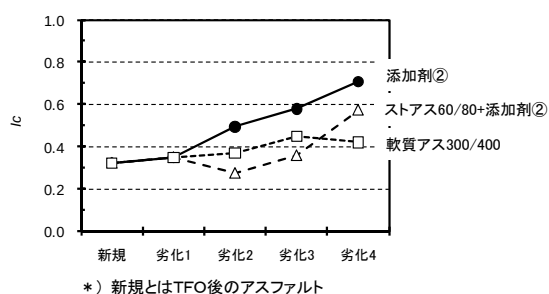


図-6 組成分析結果

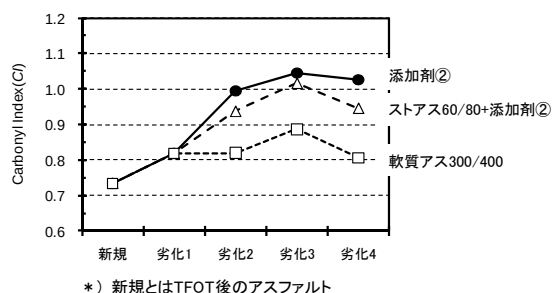


図-7 酸化度測定結果

60/80+添加剤②は劣化3回目まではIcの増加は見られないものの劣化4回目でIcが急激に大きくなった。一方、軟質アス300/400は、Icは漸増傾向にあるものの大きく増加しなかった。このことは、軟質アス300/400を用いた場合は、脆化を誘発する飽和分の蓄積を抑制できるとともに、酸化重合等によりアスファルテン等の巨大なコロイド状物質が蓄積されにくいことを示しているものと考えられる。

また図-7から、再生回数が増えるにしたがってアスファルトの酸化度は大きくなる傾向が見られ、繰返し再生によって酸化物は蓄積されてゆくことが分かる。そして、酸化物の蓄積度合いは軟化剤の種類によって異なり、再生3回目の酸化度の値は、軟質アス300/400<ストアス60/80+添加剤②≒添加剤②の順で小さくなった。酸化度の増加は、アスファルトの酸化により生成されるカルボニル基等の増加を表しており、ストアス60/80+添加剤②および添加剤②のみで再生した場合は、軟質アス300/400による場合に比べて、繰返し再生によって酸化物はより蓄積されてゆく傾向が強いと考えられる。

5. 繰返し再生におけるアスファルト混合物の性状

アスファルト単体での試験結果から、添加剤による再生には課題があり、これに代わる方法として、より繰返し再生に適していると考えられる、「軟質アス」を用いた場合について試験を行った。

(1) アスファルト混合物の性状

劣化と再生の各段階における圧裂スティフネスの測定

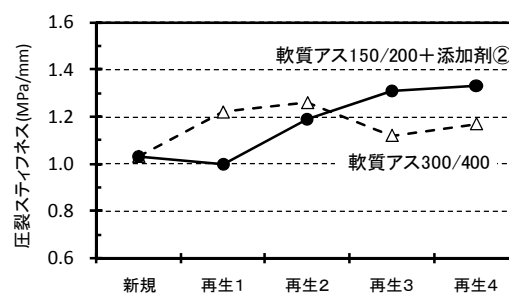


図-8 各段階における圧裂スティフネス

結果を図-8に示す。図から、再生時の圧裂スティフネスは再生回数を重ねるとともに大きくなる傾向が見られた。また、軟質アス150/200+添加剤②で再生させた場合は、軟質アス300/400のみで再生した場合と比べると単純に増加する傾向が見られ、再生3回目以降で圧裂スティフネスが大きくなった。これは、軟質アス150/200+添加剤②で再生させたアスファルト混合物は軟質アス300/400のみの場合に比べ、たわみ追従性が低下することを示していると考えられる。圧裂スティフネスは疲労抵抗性と関係していると言われていたことから、再生方法によっては、再生回数が多くなるにしたがってアスファルト混合物の疲労抵抗性が低下する可能性があると考えられる。

(2) 回収アスファルトの物理性状

各再生段階における混合物からの回収アスファルトの軟化点試験結果を図-9に、伸度試験結果を図-10に示す。図-9から、軟質アス150/200+添加剤②を用いた場合は、アスファルト単体での繰返し再生した場合と同様にアスファルト混合物の場合でも、再生回数が増えるにしたがって、軟化点は高くなる傾向が見られ、再生回数が3回目以降では軟質アス300/400のみの場合に比べ軟質アス150/200+添加剤②を用いた場合は、軟化点は高くなる傾向が見られた。また、伸度(図-10)は、軟質アス300/400のみで再生した場合は再生4回目まで100cm以上であったのに対し、軟質アス150/200+添加剤②の場合は再生3回目以降が20cm程度となった。このことから、繰返し再生を考慮した場合には、軟質アス300/400のみで再生することによりアスファルトの物理的性質の変化を抑制できると考えられる。

以上より、アスファルト混合物が繰返し再生された場合、たとえ針入度を回復したとしても再生アスファルトの性質は変化し、アスファルト混合物の性状に影響を与えることが分かった。また、再生アスファルトの性状は、使用する軟化剤の違いによる影響が見られ、特に軟質アス300/400により繰返し再生を行った場合は、軟質アス150/200+添加剤②を用いた場合に比べて、再生アスファルトの物理的性質の変化が少ないことが分かった。

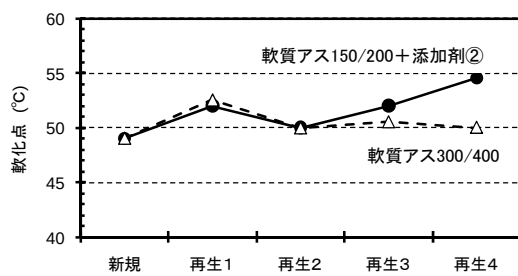


図-9 回収アスファルトの軟化点の変化

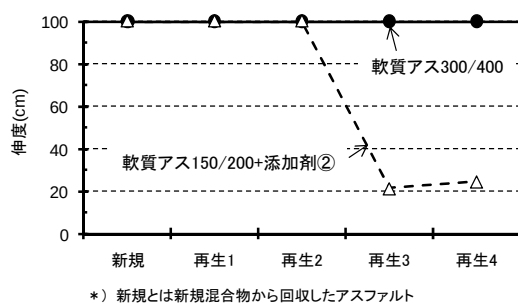


図-10 回収アスファルトの伸度の変化

6. まとめ

本研究では、アスファルト単体およびアスファルト混合物で劣化と再生を繰り返す行い、再生アスファルトおよび再生アスファルト混合物の性状を確認した。その結果、たとえ針入度を回復しても繰り返しの再生回数が増えるにしたがってアスファルトが変質し、アスファルト混合物の性能が低下する可能性があることが示された。また、劣化アスファルトの再生方法によって、アスファルトやアスファルト混合物の変状の度合いが異なることが分かった。本研究で得られた主な知見をまとめると次の通りである。

- (1) 再生用添加剤の種類によって、繰り返し再生されたアスファルトの性状はかなり異なることが分かった。
- (2) 再生用添加剤のみで再生されたアスファルトは、ストレートアスファルトと再生用添加剤の併用および軟質アスファルトのみで再生した場合に比べ、再生回数が多かった場合に軟化点が上昇し、劣化初期のアスファルトより感温性が小さくなることが分かった。

- (3) アスファルトの組成 I_c および酸化度は、繰り返し再生回数が増えるにしたがって上昇する傾向があるが、軟化剤の違いによって組成 I_c と酸化度の上昇度合いは異なることが分かった。
- (4) アスファルト混合物の圧裂スティフネスは、繰り返し回数が増えるにしたがって上昇する傾向があるが、再生方法の違いによってその上昇度合いは異なり、軟質アスのみを用いて再生させるほうが、圧裂スティフネスの変化が少ないことが分かった。
- (5) 繰り返し再生されたアスファルト混合物から回収したアスファルトの性状は再生方法の違いによって異なり、軟質アス 300/400 により繰り返し再生を行った場合は添加剤を単独もしくは併用した場合に比べ、再生アスファルトの物理的性状の変化が少ないことが分かった。

7. おわりに

今後は、再生骨材の配合率や旧アスファルトの劣化度合いなどを変化させ、アスファルトの物理的・化学的な性状を確認するとともに、アスファルト混合物の耐流動性や疲労抵抗性、再生混合物中の劣化したアスファルトの挙動について確認し、繰り返し再生利用されることを前提としたアスファルト混合物の望ましい再生方法を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 17 年度建設副産物実態調査結果について、2006.12.
- 2) (社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報
- 3) 加納：舗装分野におけるリサイクルの現状と課題，建設マネジメント技術，No.361，p.12～15，2008.6.
- 4) 新田弘之，西崎到：繰り返し再生したアスファルトの性状，第 26 回日本道路会議，論文番号 12125，2005.10.
- 5) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.6.
- 6) (社)日本道路協会：舗装再生便覧，2004.2.
- 7) (独)土木研究所：アスファルト舗装の再生利用に関する共同研究中間報告書，共同研究報告書第 387 号，2008.12.

STUDY ON THE RECYCLE METHOD OF THE ASPHALT MIXTURE WHICH CONSIDERED RECYCLE REPEATEDLY

Takashi KANOU, Hiroyuki NITTA, Iwao SASAKI, Itaru NISHIZAKI and Kazuyuki KUBO

The authors studied asphalt recycling method using soft asphalt for the purpose of suggesting the desirable recycling method of asphalt mixtures which considered repeatedly recycling. As a result, the recycled asphalt by soft asphalt performed that a physical property and chemical property may be sustainable in comparison with oil-derived rejuvenators.