繰り返し劣化・再生されたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状変化に関する一検討

川上篤史¹・川島陽子²・新田弘之³・寺田剛⁴・藪雅行⁵

¹ 正会員 博 (工) 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail : kawakami@pwri.go.jp

² 正会員 博 (農) 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³ 正会員 博 (工) 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁴ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁵ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

日本のアスファルト混合物の再生利用は 40 年以上の歴史があり、近年は再生骨材配合率が年々上昇してきていることから、今後は繰り返し再生された骨材を含むアスファルト混合物が増えるものと考えられる。しかし、アスファルト混合物を繰り返し利用した際の材料性状や混合物性状の変化は、検討が始まってきているもののまだ知見は少なく、明確になっていないのが現状である。本研究は、繰り返し劣化・再生したアスファルトおよびアスファルト混合物の性状の変化を把握するため、試験室内においてアスファルトを劣化させた後、再生用添加剤によりアスファルトの針入度を回復させ、それを複数回繰り返し、再生アスファルトおよび再生アスファルト混合物の材料性状・混合物性状の把握を行った。その結果、有用なデータが得られたので報告する。

Key Words : repeated recycling, asphalt material, asphalt mixture, reclaimed asphalt, rejuvenator

1. はじめに

わが国では、1954 年から 1973 年まで続いた高度経済成長期において一般国道の舗装率は 15.7%から 92.6%に飛躍的に増加しており¹⁾、これに伴い道路舗装工事は新設だけでなく打換えも増加し多くのがれき類が発生したと考えられる。1970 年に制定された「廃棄物の処理および清掃に関する法律」では、廃棄物の発生抑制および適切な分別、保管、収集、運搬、再生、処分等が行われることとなり、舗装工事で発生したのがれき類（舗装発生材）は「産業廃棄物」に指定され、適切に処分することが義務化された。さらに、1973 年の第一次石油ショックにより、アスファルト舗装発生材の有効活用がさらに望まれることとなった。これらを契機に、舗装発生材のリサイクルに関する研究は 1970 年代には始まり、様々なリサイクル技術が開発され発展してきた。このように、わが国ではアスファルト舗装発生材の再生利用は 40 年以上歴史があり、現在では再生アスファルト混合物の出荷割合は加熱アスファルト混合物（以下、混合物）の全出荷量に対して 75%、再生骨材配合率は全国平均で 50%に達し

ている²⁾。

以上より、今後は繰り返し再生された骨材を含む混合物の利用が増えるものと考えられる。しかし、混合物を繰り返し利用した際の材料性状や混合物性状の変化は、筆者らを含め研究が進められてきている^{3),4)}もののまだ知見は少なく、明確な現象は明らかになっていないのが現状である。

本研究では、繰り返し劣化・再生したアスファルトおよび混合物の性状を把握するため、実験室内においてアスファルトを劣化させた後、再生用添加剤によりアスファルトの針入度を回復させ、それを複数回繰り返しその影響を分析している⁵⁾。その結果、繰り返し劣化・再生されたアスファルトおよび混合物の性状の変化について、有用なデータが得られたので報告する。

2. 検討方法

(1) 試験手順

試験手順を図-1 に示す。新規のアスファルト（以下、

ORG)を試験室内で劣化・再生を繰り返し、性状変化を確認するため材料性状試験を行った。また、混合物は、ORGと劣化・再生を3回および5回繰り返した再生アスファルト(以下、N回繰り返し劣化・再生したものを劣化N、再生Nと示す)をそのままバインダとして用いて作製し、混合物性状に関する試験を行った。本試験は、再生用添加剤の影響の把握に焦点を当てたため、新規アスファルト・混合物を追加しない、いわゆる100%再生での検討とした。

(2) 試験材料の性状

アスファルト(ORG)は、表-1に示す舗装用石油アスファルト60/80を用い、再生用添加剤は一般に市販されているものであり、表-2に示す芳香族分が比較的多いものを用いた。混合物は、最大粒径13mmの密粒度アスファルト混合物で、最適アスファルト量は5.5%である。混合物の合成粒度を表-3に示す。

(3) 試験方法

試験項目を表-4に示す。アスファルトの材料性状試験

図-1 試験手順

表-1 アスファルト(ORG)の性状

密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 ℃	伸度 15℃ cm
1.037	70	46.5	100+

表-2 再生用添加剤の性状

密度 (g/cm ³)	組成 (%)			
	アスファルテン分	レジン分	芳香族分	飽和分
0.975	0.1	4.0	70.5	25.4

として、物理性状である針入度試験、軟化点試験および伸度試験を行い、動的粘弾性状としてダイナミックシアレオメータ試験(以下、DSR試験)を行った。各試験は、舗装調査・試験法便覧⁶⁾に準拠して行った。DSR試験は、表-5に示すとおり、ORG、再生3、再生5とも設定条件を統一して行った。また、化学性状として赤外吸光度測定、組成分析試験(TLC/FID法)⁷⁾を行った。

一方、混合物試験は、圧裂試験、ホイールトラッキング試験、小型曲げ試験を行った。圧裂試験およびホイールトラッキング試験の試験方法は、舗装調査・試験法便覧に準拠した。なお、試験個数(以下、n)についてはアスファルトの繰り返し劣化・再生による試料作成が容易でないため、以下の通り変更した。

試験条件は、圧裂試験は試験温度0、20、60℃、各試験温度でのnは3とした。なお、3章において後述するが、ORGの0℃および20℃付近の圧裂試験の変位が再生3および再生5と傾向が異なったため、ORGのみ10℃と40℃においてn=1で追加試験を行った。また、ホイールトラッキング試験は、試験温度60℃、n=1とした。

一方、小型曲げ試験は、既存文献⁸⁾の方法で実施し、載荷速度10mm/mm、試験温度-10、-5、0、5、10、15℃の6条

表-3 アスファルト混合物の合成粒度
(密粒度アスファルト混合物)

通過質量百分率 (%)	ふるい目の開き	合成粒度
	19 mm	100
	13.2	96.2
	9.5	84.9
	4.75	63.4
	2.36	41.1
	0.6	26.0
	0.3	16.6
アスファルト量 (%)	0.15	8.9
	0.075	5.4
		5.5

表-4 試験項目

材料試験		混合物試験	
項目	関連性状・性能等	項目	関連性状・性能等
針入度試験	アスファルトの硬さ	圧裂試験	劣化度、ひび割れ
軟化点試験	軟化温度	ホイールトラッキング試験	耐流動性
伸度試験	延性、ひび割れ	小型曲げ試験	脆化点、たわみ性
赤外吸光度測定	酸化劣化度		
組成分析試験	組成の変化		
DSR試験	動的粘弾性状		

表-5 DSR試験の条件

治具直径 [mm]	試料厚さ [mm]	ひずみ [%]	温度 [℃]	周波数 [rad/s]
8	2	1.0	-10 ~ 30	0.1 ~ 100
25	1	10.0	40 ~ 100	0.1 ~ 100

件、各試験温度でn=3である。なお、劣化5のみ15℃でn=2で行った。

3. 試験結果

(1) アスファルト材料性状

a) 再生アスファルトの混合割合

アスファルトの劣化・再生を繰り返した際の、再生アスファルト中の ORG の割合と再生用添加剤の添加割合を表-6に示す。本実験では、劣化アスファルトを再生する際、新規のアスファルトを加えず再生用添加剤のみ用いた（100%再生）ため、再生5では再生用添加剤のほう

表-6 再生アスファルトの構成

	ORG	再生1	再生2	再生3	再生4	再生5
ORG の割合	100%	81.7%	67.4%	61.2%	53.3%	46.5%
添加剤の割合	0%	18.3%	32.6%	38.8%	46.7%	53.5%

図-2 針入度

図-3 軟化点

図-4 伸度

が多くなっている。また、再生3以降は再生用添加剤の増加傾向が緩やかとなった。これらの影響についても以下の材料性状および混合物性状試験で把握した。

b) 基本物理性状

針入度および軟化点の推移を図-2および図-3に示す。再生アスファルトは針入度 70 前後に回復させているにもかかわらず、軟化点は再生3以降、高い値に移行し、そのまま推移する傾向が見られた。

次に、伸度の測定結果を図-4に示す。伸度は再生1から100cmまで回復せず、特に再生3回以降はほとんど回復しない結果となった。これらより、再生アスファルトは針入度を回復させても、劣化・再生を繰り返すと軟化点や伸度が十分に回復できない可能性があることが分かった。

c) 化学性状

赤外吸光度測定結果としてカルボニル指数の推移を図-5に示す。カルボニル指数は、劣化により増加する波数帯(1700cm⁻¹付近)のピークと劣化の影響を受けないとされる波数帯(1600cm⁻¹付近)のピークの比であり、アスファルトの酸化劣化の指標となる⁷⁾。繰り返し劣化・再生を行う毎にカルボニル指数は徐々に増加した。その増加傾向は、一定の値に収束する傾向が見られた。

次に、TLC/FID法によるアスファルトの組成分析試験結果を図-6に示す。飽和分についてはほぼ変化がなく、アスファルテン分の変化は少なかった。レジン分および芳香族分は劣化・再生の度に増減を繰り返すが、前者は全体としては増加傾向に、後者は減少傾向から横ばいになり

図-5 カルボニル指数

図-6 組成分析結果

推移した。アスファルトは一般的に、劣化が進むと芳香族分が減少し、レジン分およびアスファルテン分が増加することから、本試験においてもレジン分が増加していることが確認された。一方、再生時に芳香族分が増加しているのは、使用した再生用添加剤の成分が芳香族分の比較的多いものであることから、この影響を受けたと考えられる。

d) 動的粘弾性状

i. 複素弾性率・位相角の推移

動的粘弾性状の測定結果として、周波数 10 rad/s 時に得られた複素弾性率および位相角の推移を図-6 および図-7 に示す。複素弾性率は劣化 1 で最も高くなったが、徐々に低くなり劣化回数による変化はあまり見られなかった。これは、再生用添加剤の影響により軟らかくなっていることが考えられる。また、位相角の推移では、繰り返し劣化・再生に伴い、30~60° 以内に収束する傾向にあり、温度毎の差も小さくなった。これは、感温性の低下によるものと考えられる。

ii. 複素弾性率と位相角の関係

複素弾性率と位相角の関係 (Black diagram) を図-8 に示す。ORG はスムーズな曲線となるのに対し、再生 3 や再生 5 になるにしたがって枝分かれした状態になった。これは、高い周波数域において位相角の変化が小さくなった

た状態であり、再生用添加剤の割合が高いためだと考えられるが、今後も検討が必要である。なお、全体としては図-7 でもあったように、再生 3 や再生 5 になるにしたがって位相角は小さいほうに移行した。

iii. 複素弾性率のマスターカーブ

時間温度変換則による複素弾性率のマスターカーブを図-9 に示す。ORG と再生 3・再生 5 の挙動は、低周波数側（高温域）と高周波数側（低温域）で逆転していることが分かる。高温域では再生回数が増えるにつれて複素弾性率が高くなり、逆に低温域では再生回数が増えるにつれて複素弾性率が小さくなった。この再生回数が増えるにつれてマスターカーブの傾きが小さくなったのは、感温性が低下したことを示しているものと考えられる。

(2) 混合物試験結果

a) 圧裂試験

圧裂試験の結果として、圧裂強度と温度の関係を図-10 に示す。圧裂強度を縦軸として対数にした結果、いずれも直線状になった。圧裂強度は 0°C から 20°C では ORG が高く、再生 3・再生 5 は低い値となった。再生混合物は再生用添加剤の添加量が高いことからアスファルトによる骨材間の接着性が低くなったものと考えられる。また、60°C では ORG と再生 3 の軟化点を越えることから

図-6 60°C~0°Cの複素弾性率の推移

図-7 60°C~0°Cの位相角の推移

図-8 複素弾性率と位相角の関係 (Black diagram)

図-9 複素弾性率のマスターカーブ

図-10 圧裂強度

図-11 圧裂変位

図-12 圧裂係数

差が見られなくなっており、再生5は軟化点を超えていないので少し高い値となったものと考えられる。

次に、変位を図-11に示す。再生3および再生5の変位が温度によらずほぼ横ばいになったのに対し、ORGの変位は0°Cでは再生混合物より小さく、20°Cでは逆に大きくなった。そこで、ORGのみ10°Cおよび40°Cにおいてn=1で試験を追加した結果、20°Cをピークに凸型になった。これは既往研究⁹⁾にも見られ今後も議論が必要だと考えられるが、圧裂試験が間接引張に近い試験であること、後述する小型曲げ試験結果より、アスファルトの脆性と試験方法の特性（载荷速度など）によって、圧裂試験では20°Cがピークになったのではないかと考えられる。

図-13 圧裂強度比

表-7 動的安定度

	ORG	再生3	再生5
動的安定度 (回/mm)	720	3,000	7,880

図-14 曲げ応力

圧裂係数を図-12に示す。0°CのORGの変位が小さいため圧裂係数は大きな値となったが、20°C以降は再生3および再生5も近い値となった。特に、ORGと再生3は60°Cでは軟化点を超えておりほとんど同じ値となった。

0°Cおよび60°Cの圧裂強度より求まる、圧裂強度比を図-13に示す。ORG、再生3、再生5と繰り返し再生が進むにつれて、低温時のひび割れが発生しやすくなる可能性がある⁶⁾ことが示された。

b) ホイールトラッキング試験（動的安定度）

動的安定度を表-7に示す。動的安定度は、ORG、再生3、再生5になるにしたがって高くなった。これは、DSR試験において高温域で複素弾性率が高くなった結果を反映しているものと考えられる。

c) 小型曲げ試験

小型曲げ試験により得られた試験温度と曲げ応力の関係を図-14に、曲げひずみとの関係を図-15に示す。曲げ応力のピークおよびひずみの変曲点より、各アスファルトの脆化点はORGが5°C、再生3が0°C、再生5が-5°Cとなった。曲げ応力は、ORGの5°Cで一番高い値となり、0°C以上の温度域においてORGが高く差も大きな結果と

図-15 曲げひずみ

なった。一方、0°C以下の温度域では、再生3および再生5の曲げ応力がORGより少し高い傾向となった。これは、再生3および再生5は再生用添加剤の割合が高くなったことにより、脆性領域が低温側にシフトしたものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、アスファルトを実験室内で劣化させ、新材を追加せず再生用添加剤のみで再生（いわゆる100%再生）し、それを複数回繰り返したアスファルトの材料性状および混合物性状を把握した。その結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 再生アスファルトは針入度を回復させても軟化点は再生3回以降高い値に移行し、そのまま推移する傾向があった。また、伸度は再生1回から半分以下しか回復せず、特に再生3回以降はほとんど回復しなかった。
- 2) 再生アスファルトのカルボニル指数は、繰り返し劣化・再生を行う毎に徐々に増加し、その増加傾向は一定の値に収束する傾向が見られた。また、アスファルトの組成分析の結果、レジン分および芳香族分は劣化・再生の度に増減を繰り返すが、前者は全体としては増加傾向、後者は減少傾向から横ばいに推移した。この芳香族分の推移は、再生用添加剤の成分による影響と考えられる。
- 3) 動的粘弾性状として、複素弾性率は繰り返し劣化・再生に伴い30~60°以内に収束し、温度毎の位相角の差が小さくなる傾向となった。これは、感温性の低下が考えられる。さらに、複素弾性率と位相角の関係では、ORGはスムーズな曲線となるのに対し、再生3や再生5になるにしたがって枝分かれしたような状態となった。これは、再生用添加剤の割合が高くなった影響だと考えられる。
- 4) 混合物性状として圧裂試験を行った結果、繰り返し劣化・再生した混合物の圧裂強度はORGに比べ低くなった。再生用添加剤の混入量が高いことからアスファルト

トによる骨材間の接着性が低くなったものと思われる。また、圧裂強度比より、劣化・再生を繰り返すと低温時のひび割れ率が大きくなる可能性があることが示された。

- 5) 小型曲げ試験の結果、アスファルトの脆化点は劣化・再生を繰り返すとマイナス側に移行傾向となった。曲げ応力は、ORGのピーク値が最も高く、0°C以上の温度域はすべて高い傾向であった一方、0°C以下の温度域では、再生3および再生5の曲げ応力がORGより少し高くなった。これは再生用添加剤の割合が高くなったことにより、脆性領域が低温側にシフトしたものと考えられる。

謝辞：本試験は、日本アスファルト合材協会との共同研究「アスファルト混合物の持続的循環を目指した再生利用に関する研究」の一環として行ったもので、同協会技術部会委員から助言を頂いた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報2016，
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html>.
- 2) (社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報，2015.
- 3) 加納孝志，新田弘之，佐々木徹，川上篤史：飽和成分の多い再生用添加剤で繰り返し再生した再生混合物と再生アスファルトの性状に関する一検討，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.71, No.3（舗装工学論文集第20巻），I_65-I_71，2015.
- 4) 加納孝志，秋葉正一，加納陽輔，湯川誠二郎，田湯文将：再生用添加剤の組成の違いが繰り返し再生された混合物とアスファルトの性状に与える影響，舗装工学論文集第20巻，pp.1-73～I-78，2015.
- 5) 川島陽子，新田弘之，川上篤史，西崎到：繰り返し再生したアスファルトバインダの化学性状の評価，第32回日本道路会議，2017.10（発表予定）
- 6) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 7) 山口勝之，佐々木徹，明嵐政司：アスファルト材料の紫外線劣化とカーボンブラック添加効果，舗装工学論文集，第8巻，pp.251-260，2003.12
- 8) 新田弘之，川上篤史，西崎到：小型供試体による曲げ試験特性と中温化混合物の評価，土木学会第67回年次学術講演会，V-362，2012.9
- 9) 岡部俊幸，山口将，富澤健，金井利浩：間接引張試験における載荷板の形状に関する実験的基礎研究，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集，V-007，p.13-14，2008

CHANGES IN THE PROPERTIES OF REPEATED RECYCLED ASPHALT AND ASPHALT MIXTURE

Atsushi KAWAKAMI, Yoko KAWASHIMA, Hiroyuki NITTA,
Masaru TERADA and Masayuki YABU

The history of recycling asphalt pavement in Japan is long, and in recent years reclaimed asphalt pavement (RAP) ratio in recycled asphalt mixture has also increased. Therefore, the amount of RAP that is repeatedly recycled will be increased in the future. However, there are still few findings concerning the changes in material properties and mixture properties that were repeatedly recycled. In this research, in order to analyze the properties of asphalt and asphalt mixture for repeated recycling, asphalt was aged and recycled repeatedly five times in the laboratory, then the asphalt material properties and mixture properties of recycled asphalt and recycled asphalt mixture were examined. As a result, some useful data were obtained and there were reported.