

アスファルト舗装の繰り返し再生を考慮した評価方法の開発

川上篤史・藪 雅行・川島陽子・新田弘之

1. はじめに

アスファルト舗装を撤去した際に発生するアスファルトコンクリート塊は、再生骨材製造所において解砕・粒度調整され、再生骨材として加熱アスファルト混合物（以下「混合物」という。）に再び使用される（図-1）。この再生混合物に含まれる再生骨材の割合（再生骨材配合率。以下「R率」という。）は、全国平均で50%以上¹⁾となっており、年々上昇傾向にあるとともに、今後も続いていくと予想される。また、わが国のアスファルト舗装のリサイクルは始まって約40年経過しており、地域によって再生骨材は複数回リサイクルされていると考えられる。今後も、舗装のリサイクルを永続的に進めていくためには、新たな取り組みとして、繰り返し再生に対する影響を考慮に入れた再生利用方法の確立が必要となると考えられる。

土木研究所舗装チーム、先端材料資源研究センター（iMaRRC）は、平成28年度より研究開発プログラム「循環型社会に向けた舗装リサイクル技術に関する研究」において、アスファルト舗装の繰り返し再生により、アスファルトバインダおよび混合物に対する影響やその評価法等について研究している。本稿では、これら研究成果について紹介する。なお、試験条件や試験結果の詳細は、既報^{2),3)}を参照いただきたい。

2. 研究方法

繰り返し劣化・再生したアスファルトバインダおよび混合物の性状変化を把握するため、劣化アスファルト（熱や空気中の酸素、紫外線等により、堅く・ひび割れしやすい性状となった状態）の再生に用いられる再生用添加剤の成分組成に着目し、飽和分と芳香族分の様々な成分割合の添加剤を用いた。また、再生混合物中のR率の違いにも着目

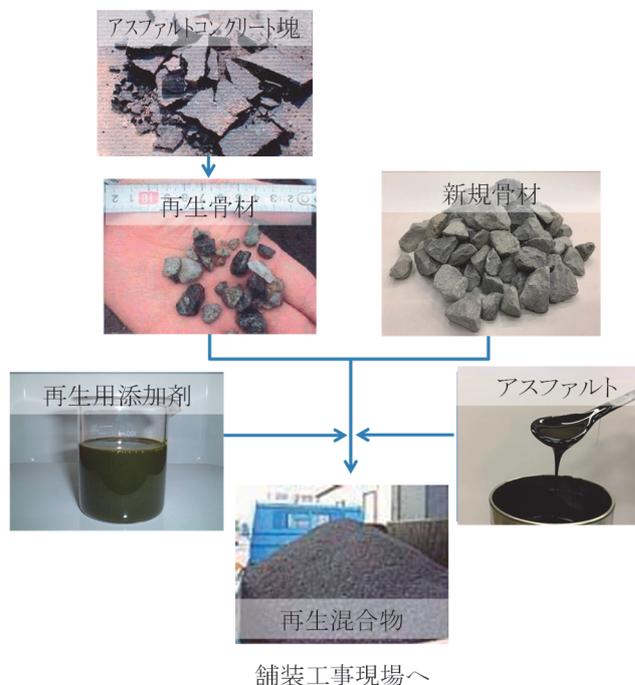


図-1 再生混合物の製造過程

し、室内において繰り返し劣化・再生試験を行った。

(1) 試験手順

繰り返し劣化・再生の試験手順を図-2に示す。R率100%での再生（以下「100%再生」という。）は図-2中の右側、30%、60%、80%再生を図-2中の左側に示す方法で行った。100%再生は、添加剤の差異による影響を最大限にするため、アスファルトバインダのみ劣化・再生させた。具体的な手順として、新規アスファルトを薄膜加熱試験（TFOT）および加圧劣化試験（PAV）により針入度20程度に劣化させ、この劣化アスファルトを添加剤により針入度70に再生した。添加剤は、後に示す成分組成の異なる5種類のものを用いた。劣化時間は、TFOTは5時間、PAVは針入度20になるまでの時間とした。100%再生では繰り返し回数を5回とした。100%再生の混合物は、この再生アスファルトを新規骨材に被膜させて作製した。

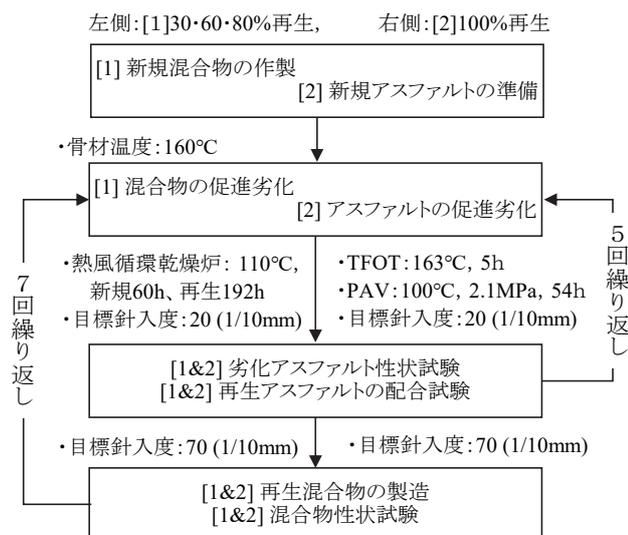


図-2 試験手順

表-1 舗装用石油アスファルト60～80の性状

密度 (g/cm ³)	1.039
針入度 (1/10mm)	70
軟化点 (°C)	46.5
伸度15°C (cm)	100+

表-2 再生用添加剤の性状

	添加剤A	添加剤B	添加剤C	添加剤D	添加剤E	
密度 (g/cm ³)	0.975	1.013	0.909	0.948	0.863	
組成 (%)	飽和分	5.7	4.9	49.9	49.8	99.9
	芳香族分	88.1	91.1	47.7	47.4	0.1
	レジン分	6.1	3.7	2.5	2.1	0.0
	アスファルテン分	0.1	0.2	0.0	0.6	0.0
PCA対応	準拠	準拠	準拠	準拠	—	

一方、30%、60%、80%再生は、これら配合率の混合物を作製し、劣化・再生した。まず、新規混合物（ORG）を製造した後、熱風循環乾燥炉による方法で劣化させてこれを再生骨材とした。劣化時間は針入度20になるよう事前に検討し設定した。再生混合物は、再生骨材のアスファルトを抽出・回収して針入度を測定し、針入度が70になるよう添加剤を加えると同時に、新規骨材および新規アスファルトの添加量を調整して作製した。添加剤は100%再生に用いた5種類の中から2種類を選定し用いた。混合物性状試験は、ORGと劣化・再生を1、3、5、7回繰り返した（以下「n回繰り返し再生したもの」を再生n」という。）混合物を用いて行った。

表-3 主な試験項目

実施している主な試験項目		関連性状・性能等
材料性状試験	針入度試験	アスファルトの硬さ
	軟化点試験	軟化温度
	伸度試験	延性、ひび割れ
	組成分析試験	組成の変化
	赤外分光分析	酸化劣化度
混合物性状試験	DSR試験	動的粘弾性状
	圧裂試験	劣化度、耐ひび割れ
	曲げ疲労試験	曲げ疲労抵抗性(低温)
	小型曲げ試験	脆化点、たわみ性
	高温カンタプロ試験	耐ひび割れ(高温)
舗装全層	ホイールラッキング試験	耐流動性
	促進載荷試験	疲労破壊輪数

表-4 曲げ疲労試験条件

制御方式	ひずみ制御
ひずみ [μ]	400
波形	正弦波
周波数 [Hz]	5
試験温度 [°C]	0

表-5 高温カンタプロ試験条件

供試体温度 [°C]	60
ロサンゼルス試験機内温度 [°C]	30
ドラム回転数	毎分30回転で300回転

(2)試験材料

試験に用いたアスファルトは、表-1に示す舗装用石油アスファルト60～80を用いた。添加剤は、表-2に示すように飽和分と芳香族分の成分割合が大きく異なる5種類を用い、30、60、80%再生では添加剤AおよびCを用いた。また、混合物の配合は最大粒径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。

(3)試験方法

繰り返し再生を行ったアスファルトおよび混合物性状の変化を把握するため、表-3に示す各種性状試験により評価した。なお、本稿では紙面の関係から一部を紹介する。

試験方法は、試験法便覧等に記載があるものは、基本的にそれらに従って実施した。このうち、圧裂試験の試験温度は0、20、60°Cである。曲げ疲労試験は、表-4に示す試験条件で行い、複素弾性率が急激に低下したときを破壊回数（N_{FE}）とした。小型曲げ試験はアスファルト混合物の低温時の脆性を把握するために行い、既存文献⁴⁾の方法で実

施した。また、後述するように、繰り返し劣化・再生により再生アスファルトの高温時の接着力が低下する傾向が得られたため、供試体温度60℃にてカンタブロ試験（高温カンタブロ試験）を行った。表-5に試験条件を示す。この高温カンタブロ損失率は、舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験とされるホイールトラッキング疲労試験（WT疲労試験）⁵⁾のひび割れ率と高い相関があり、簡易にひび割れ抵抗性を評価できる可能性があることを確認している⁶⁾。

3. 検討結果

(1) アスファルト性状（100%再生）

a) 針入度・軟化点・伸度

図-3に繰り返し劣化・再生したアスファルトの針入度（上）、軟化点（中）、伸度（下）の結果を示す。針入度については、再生アスファルトの目標針入度を70としたことから、再生後の針入度は70となる。ただし、添加剤Eに関しては、劣化5および再生5において促進劣化させても針入度が下がらなかったり、再生の際に添加剤を加えても均一に混ぜることが困難となり、正確な針入度調整ができなかった。

次に、軟化点（図-3（中））は、針入度70に再生させても添加剤の種類によって上昇する傾向がみられた。飽和分の多い添加剤C、D、Eで顕著となり、特に劣化3以降で大きくなった。一方、芳香族分の多い添加剤A、Bは微増しているがORGに比較的近い値となっていた。これより、芳香族分の多い添加剤は、軟化点の回復効果が高いことが示された。

伸度（図-3（下））は、添加剤Bは再生3回まで、添加剤Aは再生2回までである程度回復した。それに対し添加剤C、D、Eは再生2回以降ほとんど回復しなかった。軟化点と同様、芳香族分の多い添加剤は伸度も比較的回復しやすいことがわかった。なお、添加剤Bによる再生1以外は、「舗装再生便覧」に示されている伸度100cmに回復していなかったが、100%再生では新規アスファルトを全く添加しておらず、実際の再生に比べて非常に厳しい条件であったことによると考えられる。

b) 組成成分分析

図-4に組成成分分析結果を示す。どの添加剤に

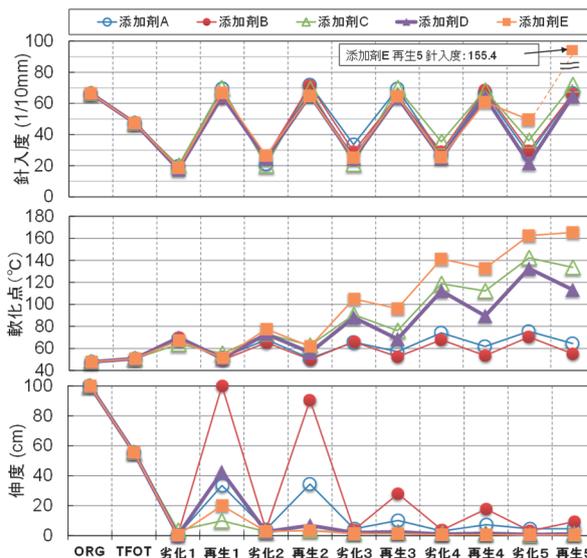


図-3 繰り返し劣化・再生アスファルトの針入度（上）・軟化点（中）・伸度（下）

においても劣化時には芳香族分が減少し、レジジン分が増加する傾向が見られた。添加剤A、Bでは、再生回数が進んでも再生後の組成比の変化が小さく、再生5でも芳香族分が40%以上となった。これは、芳香族分が多い添加剤による再生では、劣化により減少した芳香族分が添加剤により補われることによるものと考えられた。また、飽和分の多い添加剤C、D、Eでは、再生時に足される芳香族分量が少ないため、劣化・再生が繰り返されるうちに芳香族分が減少し、飽和分が増加した。特に添加剤Eは、再生時に飽和分しか足されることがないため、繰り返し劣化・再生に伴う芳香族分の減少と飽和分の増加が著しく、再生5では、芳香族分がほとんどない状態となっており、飽和分が45%を占める組成となった。

以上より、アスファルトの組成成分分析において飽和分の多い添加剤は、芳香族分の多い添加剤と比較して、再生時に芳香族分の供給が少ないので、再生アスファルトの芳香族分が減少しやすい傾向を示した。特に再生回数が進むと新規アスファルトの性状と大きく異なる組成になることが明らかになった。

(2) 混合物性状試験（100、80、60、30%再生）

a) 圧裂試験

図-5に圧裂強度比を示す。圧裂強度比は値が大きいとわだち掘れが大きく、小さいとひび割れが発生しやすいとされている⁷⁾。図より、圧裂強度

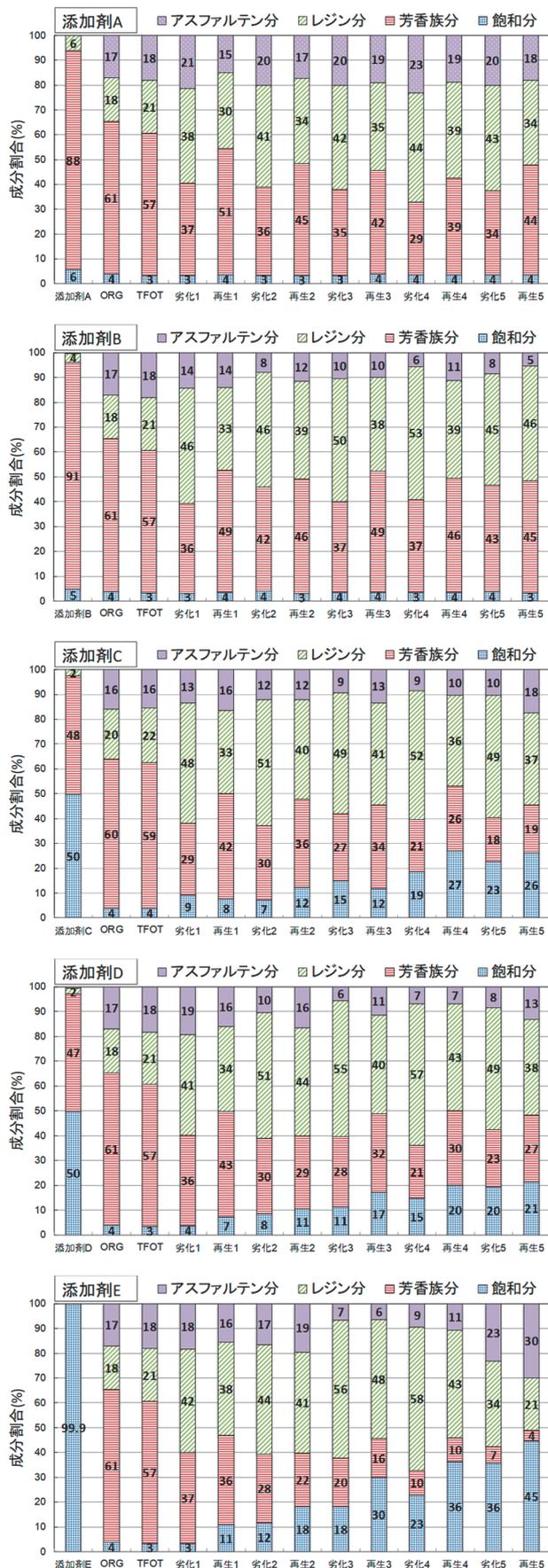


図-4 劣化・再生アスファルトの4成分組成

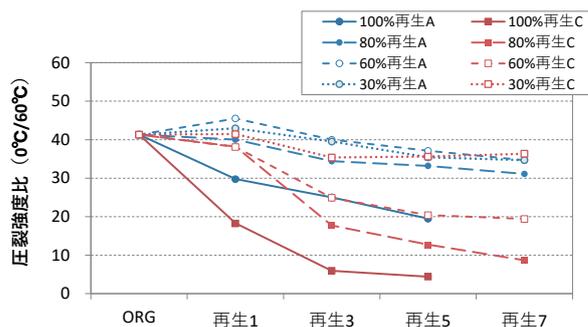


図-5 圧裂強度比

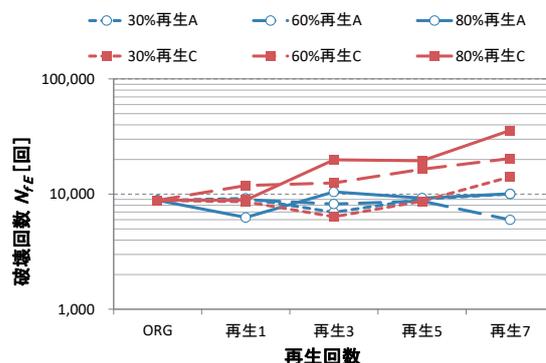


図-6 破壊回数 N_{FE} の推移

比はいずれのケースも繰り返し再生が進むにつれ減少した。その傾向はR率が高くなるほど、添加剤AよりCのほうが顕著になった。一方、添加剤Aによる100%再生を除く再生混合物と30%再生CはORGと差異が小さかった。

文献^{7,8)}によれば、圧裂強度比が20程度まで低下すると多くの舗装でひび割れが発生していた。図より、圧裂強度比20以下は添加剤Aでは100%再生5、添加剤Cでは100%再生1以降、80%再生3以降、60%再生7となることから、添加剤は芳香族分が多いAより飽和分が多いC、R率が高いほどひび割れ抵抗性の低下が懸念される。

b) 曲げ疲労試験

図-6に破壊回数 N_{FE} の推移を示す。縦軸の破壊回数は対数表示であるが、添加剤Aで再生されたすべての混合物および30%再生Cは、再生回数が増えても新規混合物 (ORG) とほぼ同等であった。それに対し、添加剤Cを用いた再生混合物では、R率が高くなるほど、再生が進むほど、 N_{FE} は増加した。このことから、0°Cの環境下では、飽和分の多い添加剤CでR率が高いほど、疲労破壊抵抗性が高い結果となった。

なお、曲げ疲労試験には応力制御とひずみ制御

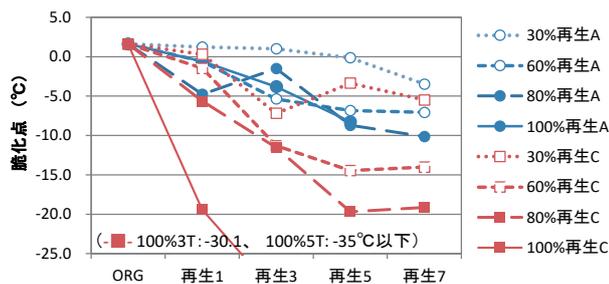


図-7 脆化点の推移

があり、前者は複素弾性率が大きいものほど発生するひずみが小さく疲労寿命は長くなり、後者は複素弾性率が大きいものほど発生する応力が大きく寿命は短くなる⁹⁾ことが知られている。本試験においても、 N_{FB} と初期複素弾性率の関係は負の関係となり、複素弾性率が大きいものほど疲労寿命は小さくなった。この複素弾性率はR率が高いほど、添加剤AよりCのほうが低く、特に添加剤Cにより7回繰返し再生された60%再生7C、80%再生7CはORGに比べ40%程度以下となった。

この低い複素弾性率の性状を有する混合物については、基層に比べて表層の複素弾性率が相対的に小さい場合には表層表面近くに最大ひずみが発生し、舗装表面から入るひび割れの発生要因になることが指摘されている。よって、複素弾性率の急激な低下や高温時（低い複素弾性率）におけるひび割れ抵抗性への影響が懸念される。

c) 小型曲げ試験

図-7に破断時ひずみの変曲点から算出した脆化点を示す。これらより、繰返し再生が進むにつれ脆化点が低温側に移行していくことが明らかになった。この傾向はR率が高くなるほど、添加剤AよりCのほうが顕著になった。添加剤AやR率が低い、30%再生1~5A、30%再生1Cおよび60%再生1A・1CはORGと同等となった。

これらより、再生混合物の低温時たわみ追従性は、R率が低く再生回数が少ないと新規混合物と同等であるが、添加剤AよりCを用いてR率が高く、再生回数が進むほど、よりたわみ追従性を有する結果となった。ただし、0°C以上では再生混合物のいずれも曲げ強度がORGより大きく低下していたことから、常温や高温でのひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

d) 高温カンタプロ試験

高温カンタプロ損失率を図-8に示す。なお、後

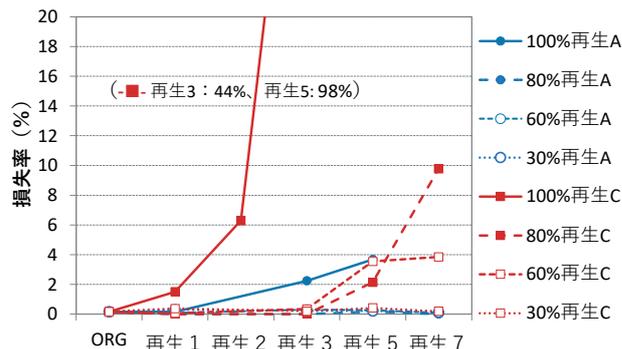


図-8 高温カンタプロ試験結果

述するように、100%再生Cについては損失率が他に比べて高かったことから、再生2回についても試験を行った。その結果、添加剤Cにより再生されたR率60、80、100%の混合物および添加剤Aにより再生されたR率100%の混合物は、繰返し再生が進むにつれて損失率が高くなった。特に、100%再生3Cは損失率44%、同5Cは98%となり、顕著な値となった。本試験は、舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験とされるWT疲労試験と高い相関が確認されている。したがって、飽和分の多い添加剤Cにより再生された混合物でR率が高いものは、実道においても高温時のひび割れ抵抗性が低下する可能性があり、芳香族分の多い添加剤で再生された混合物やR率が低い混合物は高温時のひび割れが抑えられる可能性があることが示唆された。

(3) 高温時ひび割れ抵抗性の評価方法

圧裂試験で求められる圧裂強度比は、値が小さいとひび割れが発生しやすいとされている⁷⁾。また、高温カンタプロ試験も、WT疲労試験と高い相関が確認され、高温時のひび割れ抵抗性の評価に用いることができる可能性がある。この両試験の関係性を整理し、その適用可能性について検討した。

関係性の整理については、高温カンタプロ損失率を目的変数、0、20、60°Cの圧裂試験結果（圧裂強度、変位、圧裂係数、圧裂強度比）を説明変数として累乗関数で近似式を算出し、その二乗平均平方根誤差（RMSE）を求めた。その結果、RMSEが最小になったのは圧裂強度比であり、両指標のプロットデータを図-9に示す。圧裂強度比と高温カンタプロ損失率は関係性が高いことが明

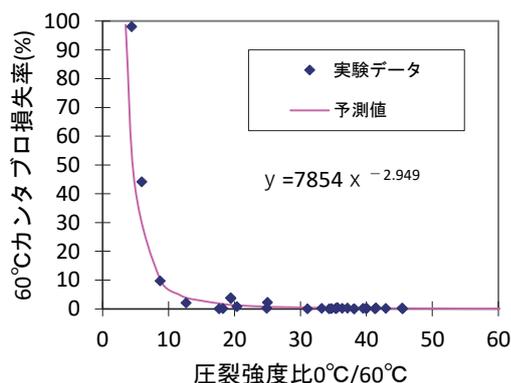


図-9 高温カンタプロ試験と圧裂強度比結果

らかになった。また、圧裂強度比20程度から損失率が上昇しはじめ、圧裂強度比10付近で損失率が顕著に上昇していることが確認できる。したがって、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性は、この圧裂強度比や高温カンタプロ損失率の指標値を用いることによって定量的に評価することが可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究結果により、繰り返し再生によるアスファルト・混合物の性状が再生用添加剤や再生骨材配合率によって差異があることを明らかにするとともに、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価方法について提案した。なお、現在、実際の再生骨材を用いた場合や実大施工等により本試験結果の検証等を進めている。今後も適切な再生利用方法等について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本アスファルト合材協会：2020年度アスファルト合材統計年報、2021.
- 2) 新田弘之、田湯文将、川島陽子、川上篤史：繰り返し再生したアスファルトの性状における再生用添加剤の組成の影響、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.75、No.1、59～67、2019.
- 3) 川上篤史、新田弘之、藪雅行、掛札さくら、川島陽子：繰り返し再生したアスファルト混合物への再生用添加剤と再生骨材配合率の影響、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.76、No.2 (舗装工学論文集第25巻)、I_251～I_259、2020.
- 4) 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.
- 5) 平戸利明、姫野賢治、村山雅人、高橋将人、高橋修：応力緩和に着目した縦表面ひび割れの発生メカニズムとその要因土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、舗装工学論文集第21巻、I_203～I_210、2016.
- 6) 田湯文将、新田弘之、川上篤史、川島陽子：アスファルト混合物の疲労破壊抵抗性に関する評価方法の検討、第33回日本道路会議、3055、2019.
- 7) 公益社団法人 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、2019.
- 8) 建設省関東技術事務所：昭和56年度試験道路における試験調査報告書、建設省、1982.
- 9) 丸山暉彦、中村健、雑賀義夫：アスファルト混合物の疲労特性、アスファルト、Vol.44、No.208、pp.9～15、2001.

川上篤史



土木研究所道路技術研究グループ舗装チーム 主任研究員、博士(工学)
Dr.KAWAKAMI Atsushi

藪 雅行



土木研究所道路技術研究グループ舗装チーム 上席研究員
YABU Masayuki

川島陽子



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 主任研究員、博士(農学)
Dr.KAWASHIMA Yoko

新田弘之



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 上席研究員、博士(工学)
Dr. NITTA Hiroyuki