

再生骨材の低針入度化を踏まえた再生アスファルト混合物の 新たな評価方法と品質向上対策に関する研究

(株)NIPPO 総合技術部 技術研究所 研究第二グループ	末原 俊史
(株)NIPPO 総合技術部 技術研究所	安藤 政浩
国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ	川上 篤史
国立研究開発法人 土木研究所 材料資源研究グループ	川島 陽子
北海道科学大学 工学部 都市環境学科	亀山 修一

1. はじめに

わが国のアスファルト混合物は1970年代にリサイクルが始まり、繰り返し再利用されることで再生骨材中に含まれるアスファルトの針入度が低下する傾向がある。このことから、今後は、針入度の規格を満たさない再生骨材が増加し、持続的な再生利用が困難になるおそれがある。また、改質アスファルトの普及により改質由来の再生骨材が増えており、これも再生骨材の低針入度化が助長される一因と考えられる。

わが国では、再生アスファルト混合物（以下、再生混合物）の評価項目として圧裂係数が舗装再生便覧に記載されている。再生骨材の低針入度化は再生混合物の性状に影響を及ぼすことが考えられるが、圧裂係数や疲労試験によって評価した既往研究¹⁾は少なく、再生混合物の力学特性には未解明な部分が多い。

一方、再生混合物を製造する際には針入度を回復するために再生用添加剤を添加するが、再生骨材内部への浸透状態により性状が変化することが考えられる。しかし、この再生用添加剤の浸透状態に関して均一性を確認した研究事例は少ない。

本研究は、再生骨材の低針入度化と再生骨材配合率が高いというわが国の実状を踏まえ、これまで未解明であった再生混合物のひび割れ抵抗性と疲労抵抗性に着目し、海外の評価方法も含めて新たな試験方法を検証した。

また、再生用添加剤の浸透性を高める新たな添加方法を考案し、実機工場による製造と実路による試験舗装で混合物性状の向上効果を確認した。

本報は、低針入度化した再生骨材を含む再生混合物の新たな評価方法の開発と、再生混合物の品質を向上させる再生用添加剤の添加方法を明らかにしたので報告する。

2. 再生混合物の新たな評価方法の検討

2-1 試験材料

再生混合物の新たな評価方法の開発には、再生骨材の品質変動を極力小さくするため、室内で混合物を促進劣化させ、再生骨材を作製した。具体的には舗装調査・試験法便覧（以下、試験法便覧）B020を参考に、改質Ⅱ型アスファルトを使用して密粒度(13)混合物を製造し、7.5kgを36cm×24cmの金属製バットに敷き均し、110℃の乾燥炉で加熱することにより劣化させた。

その際、加熱時間を変えることで、劣化程度が異なる3種の再生骨材を作製した。各再生骨材の回収アスファルト針入度および針入度を70に回復させる再生用添加剤の添加量は表-1に、再生用添加剤の性状は表-2に示すとおりである。

再生混合物の配合は密粒度(13)の中央粒度を目標に設定し、前述の劣化程度が異なる再生骨材を使用して配合率を30%、50%、70%と変化させた。なお、目標針入度は再生用添加剤とストアス60/80を用いて70に調整した。

2-2 新たな評価方法

再生骨材の針入度低下の影響は、アスファルトの劣化や改質由来の影響を勘案すると、再生混合物は硬質化することが考えられるが、その一方でたわみ追従性が低下した場合は、疲労抵抗性の低下が懸念される。ひび割れ

表-1 再生骨材の促進劣化時間と再生用添加剤量

アスファルト 種類	目標針入度 (1/10mm)	促進劣化 時間 (時間)	回収As 針入度 (1/10mm)	再生用 添加剤量※ (%)
改質Ⅱ型	25～30程度	48	27	10.6
	20前後	96	20	12.7
	10～15程度	288	14	23.3

※ 再生用添加剤量 目標針入度:70の添加量

表-2 再生用添加剤の性状

項 目	性状値	項 目	性状値
動粘度 (60℃) mm ² /s	82.71	飽和分 mass%	83.2
引火点 ℃	260	芳香族分 mass%	13.5
薄膜加熱後の粘度比	1.05	レジン分 mass%	1.6
薄膜加熱質量変化率 %	-1.37	アスファルテン分 mass%	0.0
密度 (15℃) g/cm ³	0.925		

抵抗性や疲労破壊抵抗性の評価方法については、一般的に試験法便覧 B018T 曲げ疲労試験により評価されているが、試験機の構造上、高温条件で評価ができないことや、繰り返し再生された混合物は低温時に疲労破壊回数が増加することがあり、再生混合物の力学特性には未解明な部分が多い。

ここで、海外に目を向けると、米国のイリノイ州では、2013 年から「Semi-circular bending beam test : AASHTO TP 124-18」(以下、SCB試験)を用いて再生混合物のひび割れ抵抗性を評価し、ハンブルグホイールトラッキング試験と併用して再生混合物の品質基準を定めた事例²⁾があることから、常温域(25℃)における評価として本試験により評価を行うこととした。

次に、高温域での評価に関しては、40℃において車輪走行による再生混合物の繰り返し载荷試験を行った研究³⁾では、再生骨材の劣化状態とひび割れ抵抗性の関係を見出した報告もあるが、本試験方法は走行回数 500 回毎にひび割れ率を計測する必要があり、手間と時間を要す。そこで、高温域(40℃)の疲労特性の評価が可能な試験方法として、フランスで使用事例が多い 2 点繰り返し曲げ試験を試みることにした。

一方、再生用添加剤の添加量の観点から考えると、再生骨材の針入度が低いものほど、再生用添加剤の添加量は増加する。再生用添加剤はアスファルトと比較すると感温性が低いため、再生用添加剤の添加量が多い再生混合物は、低温域でスティフネスが低下することが予想される。そこで、低温域の疲労抵抗性を確認するため、新たな評価法として SCB 試験と「Nottingham Asphalt Tester」とを組み合わせた試験方法を考案し、これにより評価した。以下に、詳細を示す。

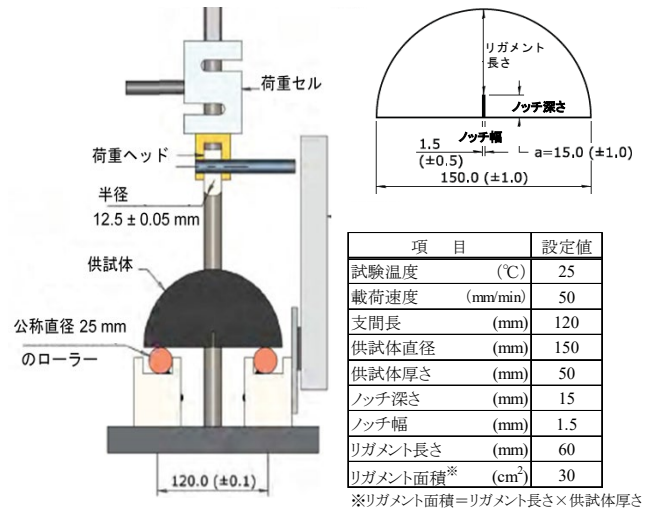


図-1 SCB試験の载荷装置と試験条件

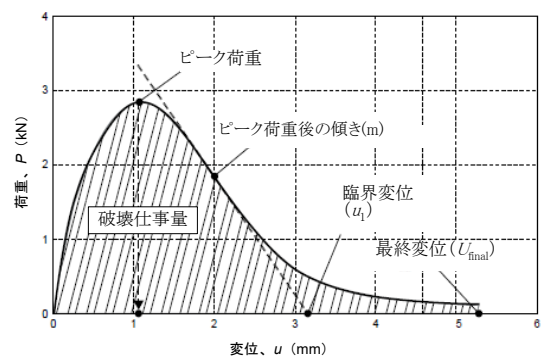


図-2 SCB試験の変位-荷重曲線

$$\text{柔軟性指数 (FI)} = \frac{\text{破壊仕事量} / \text{リガメント面積}}{\text{ピーク荷重後の傾き}} \quad \dots \text{①式}$$

(1) SCB試験による評価

SCB試験の载荷装置および試験条件を図-1 に示す。試験結果の解析は、図-2 に示す変位-荷重曲線より、①式を用いて柔軟性指数 (Flexibility Index : 以下 FI) を算出し、評価した。イリノイ州では FI と実路のひび割れ率の関係を見出し、FI をひび割れ抵抗性の指標としている。

また、SCB試験時に得られるデータを活用し、破壊エネルギーによる評価も行った。破壊エネルギーは、荷重と変位量の積算値である破壊仕事量 (図-2 ハッチ部) をリガメント面積で除したもので、曲げ仕事量とピーク荷重後の引張仕事量を併せた力学特性と解釈できる。そのため、破壊エネルギーでもひび割れ抵抗性を評価できるものと考えた。

(2) 2点繰り返し曲げ試験

高温域の疲労抵抗性を評価する試験方法は、写真-1 に示す 2 点繰り返し曲げ試験「Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens : EN12697-24」であり、混合物条件および試験条件は、表-3 に示すとおりである。

表-3 混合物条件と試験条件

混合物条件			
混合物種	密粒度(13)	目標針入度	70
再生骨材のAs種	改質Ⅱ型	劣化水準	Pen14, Pen27
混合物のAs種	ストアス60/80	再生骨材配合率(%)	0, 30, 50, 70
試験条件			
試験温度=40℃	載荷速度=25Hz	歪量=500 μ	波形=sin波



写真-1 2点繰返し曲げ試験機と供試体

(3) NAT-SCB試験

低温域における混合物の疲労特性を評価する試験方法としては、「Nottingham Asphalt Tester」を使用した「Indirect Tensile Stiffness Modulus Test : EN12697-24」とSCB試験を組み合わせた試験方法を考案した。これは、SCB試験用供試体（半円型供試体）を用いて荷重制御により繰返し載荷試験を行うもので、試験条件と試験状況は、写真-2に示すとおりである。

2-3 検討結果

(1) 従来の評価方法（圧裂係数）による評価

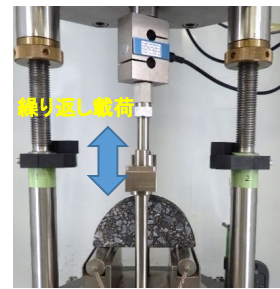
検討のはじめとして、圧裂係数による評価を行った。試験温度は針入度試験と同じ25℃とし、再生骨材配合率と圧裂係数の関係を図-3に示す。なお、図中に示す再生骨材配合率0%の点は、ストアス60/80を使用し、密粒度(13)の中央粒度を目標とした新規混合物である。

同図より、再生骨材の針入度や配合率の変化に対して明確な傾向が認められなかった。これは、舗装再生便覧にはアスファルト針入度60/80の設計圧裂係数(20℃)は0.40~0.60MPa/mmであり、本試験温度は25℃であるが、ほぼ同様の値になったものと考えられる。

(2) SCB試験による評価

再生骨材配合率とFIの関係を図-4に示す。再生骨材の針入度が低いものはFIが低い傾向にあり、再生骨材の劣化に伴いひび割れ抵抗性が低下する傾向が確認された。また、再生骨材配合率とFIの関係も、再生骨材配合率の増加に伴いFIは低下し、ひび割れ抵抗性が低下する傾向が確認された。

次に、再生骨材配合率と破壊エネルギーの関係を



試験条件	
試験温度	10℃
荷重	1.6kN
載荷速度	2Hz

写真-2 NAT-SCB試験状況と試験条件

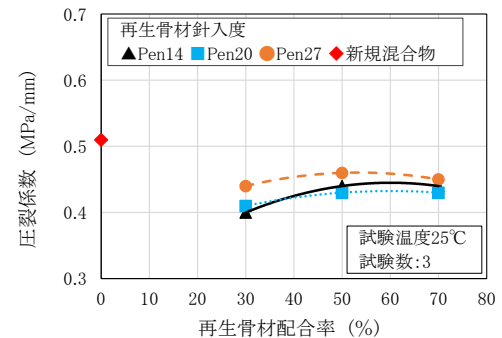


図-3 圧裂係数の傾向

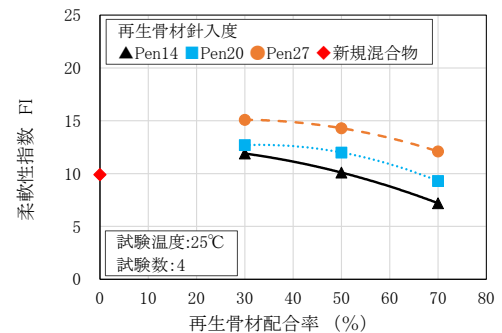


図-4 再生骨材配合率とFIの関係

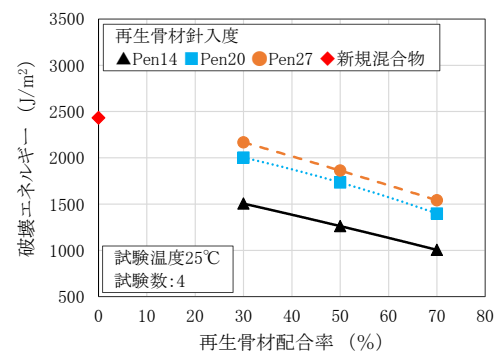


図-5 再生骨材配合率と破壊エネルギーの関係

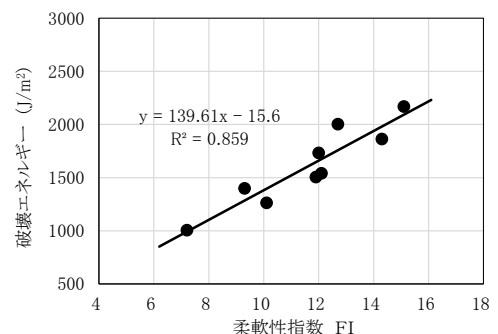


図-6 FIと破壊エネルギーの関係

図-5 に示す．再生骨材の針入度低下や配合率の増加に伴い，破壊エネルギーは低下する傾向が認められた．

また，F I と破壊エネルギーの関係は，図-6 に示すとおり高い相関があり，破壊エネルギーでもひび割れ抵抗性が評価できるものとする．

同様の結果は，ストアス 60/80 を促進劣化させた再生骨材を用いても得られており，破壊エネルギーは，再生骨材の劣化程度や再生骨材配合率の影響を評価する有効な手法と考える．

さらに圧裂試験に関しても破壊エネルギーを算出した結果を図-7 に示す．SCB試験と同様に再生骨材の針入度低下や配合率の増加に伴い，一様に低下する傾向が認められた．また，SCB試験による破壊エネルギーと圧裂試験による破壊エネルギーとの関係は，図-8 に示すとおり高い相関があり，汎用的な試験方法である圧裂試験を用いても破壊エネルギーを算出することで，ひび割れ抵抗性の評価方法となることが明らかになった．

(3) 2点繰返し曲げ試験

試験結果を図-9 に示す．再生骨材の針入度低下や配合率増加に伴い，疲労破壊回数が低下する傾向が確認された．その傾向は，針入度が低い再生骨材の方が低下傾向が大きく，針入度 20 以上の再生骨材と比較すると 20～30%疲労抵抗性が低い傾向にあった．

このことは，針入度を 70 にすることで 25℃の温度域の硬さは調整されているものの，40℃の温度域ではアスファルトの硬質化は改善されず，このために疲労抵抗性が低下したものと推察される．

(4) NAT-SCB試験

試験結果は図-10 に示すとおりであり，配合率の増加に伴い，疲労破壊回数が低下する傾向が確認された．また，再生骨材の針入度の低下に伴い，大きく疲労抵抗性が低下することも確認された．この様な現象は，再生用添加剤の添加量が影響した可能性があるが，温度条件を変化させて検討するなどして要因究明が必要と考える．

3. 再生用添加剤の添加方法の検討

3-1 試験材料

再生用添加剤の添加方法の検討には，改質アスファルト舗装由来の実際の再生骨材を用いた．再生骨材の性状を表-5，実機プラントで用いている再生用添加剤の性状を表-4，再生混合物の配合を表-6 に示す．

3-2 検討方法

本研究では，適切な浸透状態を確保するため，添加後

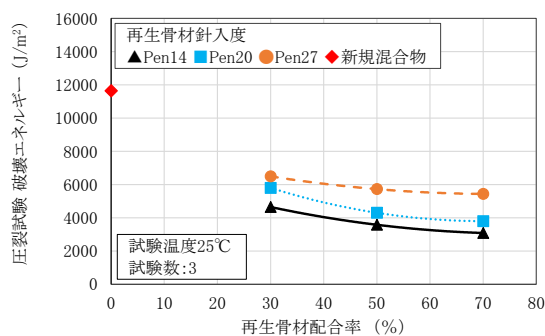


図-7 圧裂試験による破壊エネルギーの傾向

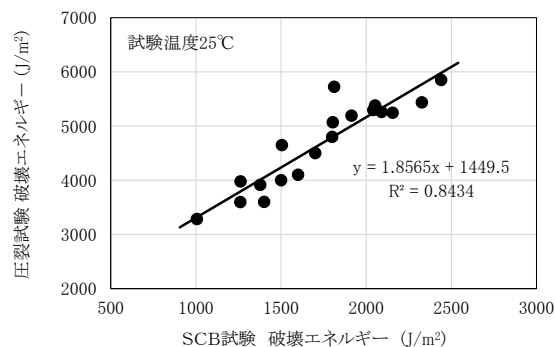


図-8 SCB試験と圧裂試験の相関

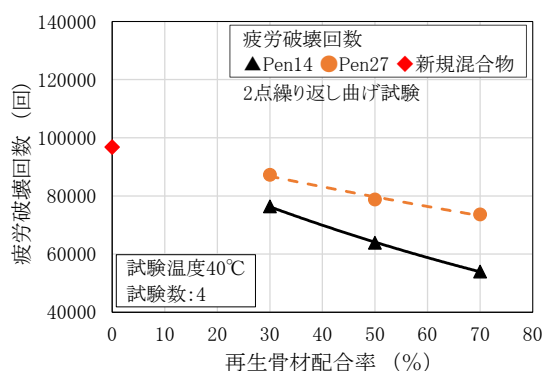


図-9 再生骨材配合率と疲労破壊回数の関係

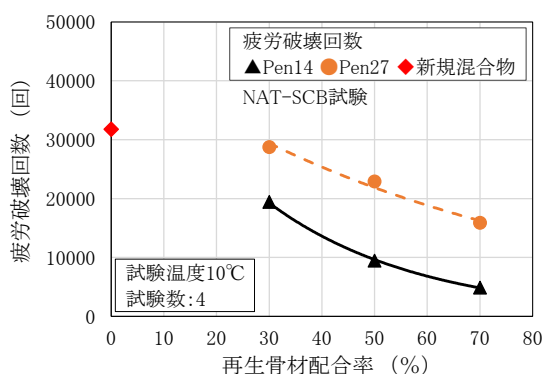


図-10 再生骨材配合率と疲労破壊回数の関係

表-4 再生用添加剤の性状

項目	性状値	項目	性状値
動粘度 (60℃) mm²/s	83.10	飽和分 mass%	33.9
引火点 ℃	274	芳香族分 mass%	65.0
薄膜加熱後の粘度比	1.08	レジン分 mass%	1.0
薄膜加熱質量変化率 %	-0.76	アスファルテン分 mass%	0.1
密度 (15℃) g/cm³	0.928		

の養生時間を延長する必要があると考えた。しかし、再生用添加剤は、一般的には再生骨材加熱後に添加するため、サージビンの貯蔵時間を延長すると加熱による劣化が懸念される。このため、常温で添加し、長時間養生する再生方法について検討した。

検討は、低針入度の再生骨材を使用して常温状態で再生用添加剤を添加し、一定の期間養生した後に混合物を製造する方法（以下、事前添加方式）を標準的な製造方法（以下、標準再生方式）と比較した。添加剤量および養生期間を表-7に示す。目標針入度は70とし、事前添加方式は、再生骨材の針入度が変動した場合でも随時、添加量の調整ができるよう、加熱後添加（全量の約3割程度）と併用する方法とした。混合物性状試験は、25℃の混合物特性をSCB試験により、低温域(10℃)はNAT-SCB試験、高温域(40℃)は2点繰返し曲げ試験により、標準再生方式と事前添加方式を比較した。

3-3 検討結果

事前添加方式の養生日数と破壊エネルギーとFIの結果を図-11に示す。事前添加方式は養生期間の経過に伴い、FIと破壊エネルギーが20~30%増加する傾向が認められた。ここで、前章の図-5では、針入度14は針入度20と比較してFIや破壊エネルギーが20~30%低かった。しかし、事前添加方式により再生混合物を製造すると、FIや破壊エネルギーは20~30%向上することから、針入度が20未満の再生骨材を使用しても針入度20以上の再生骨材を使用した混合物と同等程度のFIや破壊エネルギーに引き上げられる可能性があると考えられる。なお、養生日数3日と7日では大きな差異はなく、20℃の気温条件では3日以上での養生が必要と判断される。

次に、疲労試験の結果を図-12に示す。事前添加方式は、低温域(10℃)と高温域(40℃)のいずれの試験条件においても疲労破壊回数が30%程度増加した。以上のことから、事前添加方式（常温で再生用添加剤を再生骨材に添加し3~7日間養生した後に混合物を製造する技術）は、再生混合物の混合物性状の向上に有効であり、低針入度再生骨材の活用を補助する一方策として期待できる。

4. 実路における試験舗装

前述の室内試験より、事前添加方式は再生混合物の疲労抵抗性を向上させる効果が確認されたため、実機プラントにより製造し、混合物性状を確認するとともに、実路で試験舗装を実施して施工性を確認した。

製造は、当社の御殿場合材工場において、前述と同様

表-5 再生骨材性状

項目	性状値
通過質量百分率 (%)	
13.2 mm	100.0
4.75	69.3
2.36	50.7
0.6	31.5
0.3	23.5
0.15	16.0
0.075	10.1
アスファルト量 (%)	4.84
針入度 (1/10mm)	12
軟化点 (℃)	73.5

表-6 混合物配合

項目	配合値 (%)
再生骨材	49.7
6号砕石	17.9
7号砕石	8.5
スクリーニングス	6.6
粗砂	13.2
石粉	0.9
最適As量	5.80
新As(ストアス60/80)	2.71
旧As	2.58
再生用添加剤	0.51

表-7 再生用添加剤の添加方法と養生期間

再生用添加剤の添加方式	再生骨材	添加量 (%)	養生期間
標準再生方式	加熱後添加※2	加熱(160℃)	19.6
事前添加方式	加熱前添加※1	常温 (20℃)	15.6
	加熱後添加※2	加熱(160℃)	4.0

※1.加熱前添加:再生骨材を加熱前に添加剤を添加する方法

※2.加熱後添加:再生骨材を加熱後に添加剤を添加する方法

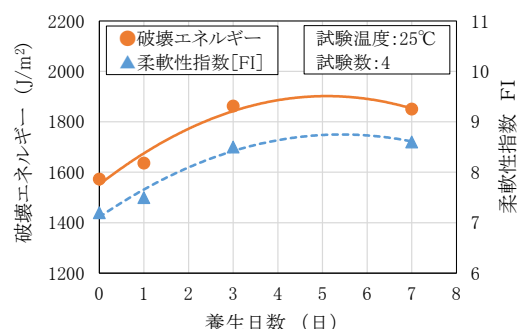


図-11 事前添加方式の養生日数と混合物性状の変化

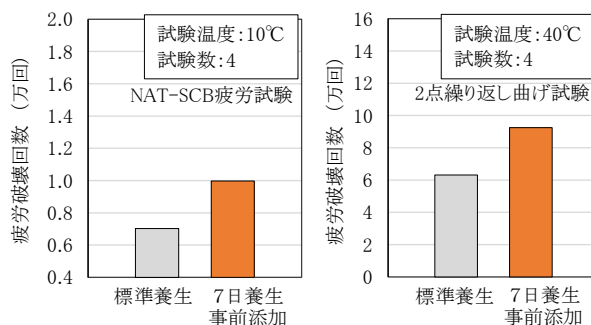


図-12 事前添加方式の疲労抵抗性 (室内)

表-8 試験舗装概要

項目	標準再生方式	事前添加方式
延長 (m)		40
幅員 (m)		3.6
舗装厚 (mm)		50
再生用添加剤量 (%)		
加熱前添加	—	15.6
加熱後添加	19.6	4.0
混合物種類	再生密粒度(13)	
再生骨材配合率 (%)	50	
混合物製造温度 (℃)	170	
初期転圧温度 (℃)	140	
二次転圧温度 (℃)	100	



写真-3 試験舗装完成状況

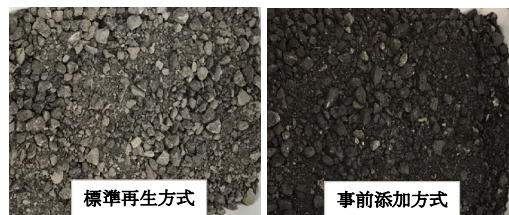


写真-4 再生骨材の状況

に標準再生方式と7日養生の事前添加方式を比較した。実路における試験舗装は芦ノ湖スカイラインにおいて実施した。概要は表-8 および写真-3 に示すとおりである。

事前添加後の再生骨材状況は、写真-4 に示すとおりであり、事前添加方式は再生用添加剤により黒色に変色している。しかし、施工後の舗装表面は、ほぼ同等の仕上がりであり、混合物の施工性や転圧時の落ち着きもほぼ同等であった。

実機工場で製造された混合物の性状を図-13 に示す。

事前添加方式により製造した混合物は、標準方式と比較して、破壊エネルギー、F I ともに約20～30%向上することが分かった。次に、NAT-SCB試験と2点繰返し曲げ試験により疲労抵抗性を比較した結果を図-14 に示す。事前添加方式は、いずれの温度域においても疲労抵抗性が約40～50%向上する結果が確認された。

さらに、現場採取コアによる圧裂試験の結果を図-15 に示す。事前添加方式は、圧裂試験から得られる破壊エネルギーも約20%向上することが分かった。

5. まとめ

本研究では、SCB試験から得られるF Iや破壊エネルギーで判定することにより、再生混合物のひび割れ抵抗性に関して定量的な評価を可能にした。さらに、圧裂試験から得られる破壊エネルギーでも同様の評価が可能であり、汎用的な評価手法も見出した。次に、疲労抵抗性に関しては、高温域(40℃)と低温域(10℃)で2種の疲労特性を検証した。高温域では2点繰返し曲げ試験で再生骨材の劣化の影響を評価し、低温域では「Nottingham Asphalt Tester」とSCB試験を組み合わせた疲労試験で再生用添加剤の影響を評価した。2種の評価方法は、いずれも再生骨材の針入度低下や配合率増加に伴い、一様に疲労破壊回数が低下する傾向が確認され、再生混合物の疲労抵抗性についても具体的な評価方法を見出した。

また、低針入度の再生骨材に再生用添加剤を常温で添加し、3日以上養生後に混合物を製造する方法は、従来の製造方法の混合物より破壊エネルギーや疲労抵抗性が20～30%向上することを確認した。この製造方法は、針入度が規格を外れる再生骨材を使用した際に低下する混合物性状を補う方法として有効な技術と考える。

6. おわりに

わが国のアスファルト混合物の再生事業は、半世紀を過ぎて再生骨材の低針入度化が進行し、変革の時期にあ

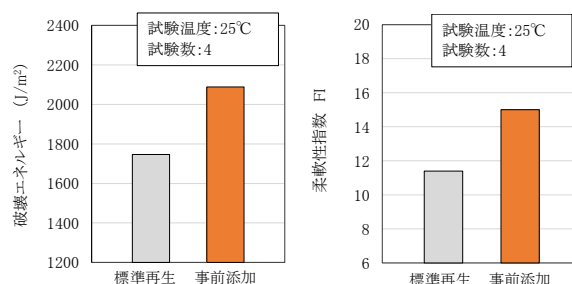


図-13 破壊エネルギーおよび柔軟性指数（実機）

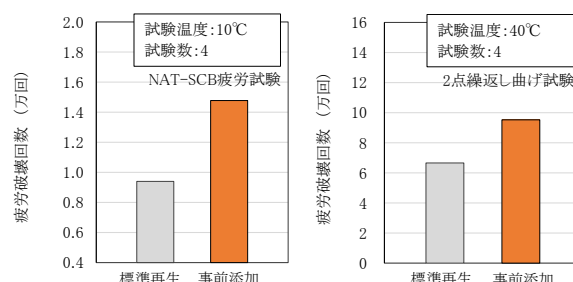


図-14 事前添加方式の疲労抵抗性（実機）

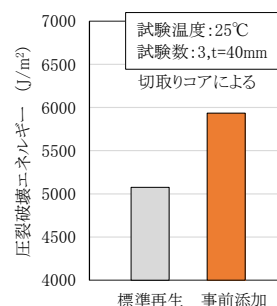


図-15 現場コアによる圧裂試験の破壊エネルギー

るといえる。維持修繕ストックが増大する中で、今後も再生事業を継続するには、低針入度再生骨材の活用は不可欠であるが、活用には再生混合物の品質評価方法の確立と品質規格の設定が必要であり、本研究で得られた知見が低針入度再生骨材を活用する一助になることを期待する。今後は、実道における耐久性や長期的な供用性などを検証し、再生混合物の評価方法を確立したい。

参考文献

- 1) 高橋修，平澤佑太：品質基準を下回る再生骨材を使用した再生アスコンの性能評価に関する一検討、土木学会論文集 E1 (舗装工学), vol.74, No3
- 2) Impact of High Recycled Mixes on HMA Overlay Crack Development Rate, Road Materials and Pavement Design 2017
- 3) 田湯文将，新田弘之他：混合物の疲労破壊抵抗性に関する評価方法の検討、日本道路会議, 2019.11