

博士論文

老朽化再生骨材を適用した
再生アスファルト混合物の品質向上に関する研究

2022年3月

北海道科学大学大学院
工学研究科 工学専攻 博士後期課程
安藤 政 浩

概 要

わが国のアスファルト舗装は 1980 年代前半にリサイクルが始まり、その後 40 年に渡って繰り返し再利用が行われてきたため、近年では、再生骨材中のアスファルトが老朽化し、針入度の規格を満足する再生骨材が減少している。このため、今後は持続的な再生利用が困難になるおそれがあり、その対策が喫緊の課題となっている。

また、再生混合物に関する品質評価の方法は、舗装再生便覧に圧裂係数が記載されているが、再生骨材の劣化程度や配合率の影響を定量的に評価する方法や、基準について明確に示されておらず、再生混合物の評価方法は未だ確立されていない状況にある。

そこで、本研究では、アスファルト舗装の持続的なリサイクルを目指すために、これまで未解明であった再生混合物の力学性状を適切に評価できる方法を見出すとともに、老朽化によって規格を外れた再生骨材の有効的な活用を目的に、再生混合物の品質を向上する技術について開発を行った。

本論文は 6 つの章で構成しており、各章の概要は以下に示すとおりである。

第 1 章では、アスファルト舗装の再生利用に関して、わが国の社会背景を踏まえた上で、研究背景と研究の目的について示した。

第 2 章では、アスファルトの劣化メカニズムや性状変化を評価する既往の試験方法について示した。また、再生混合物の力学特性や再生用添加剤の影響、実路の供用性などに関する既往の研究内容を整理し、再生利用を持続するための課題を示した。

第 3 章では、再生混合物の力学特性を適正に評価できる試験方法とその検証結果を示した。再生混合物のひび割れは温度域で応じた評価方法が必要なことを解明し、新たに考案した 3 種の評価方法を示した。第 1 の評価方法は、25°C で実施する「Semi-circular bending beam test : AASHTO TP 124-18」(以下、SCB 試験)を参考にリフレクションクラックに対するひび割れ抵抗性の評価について有効性を検証した。この結果、SCB 試験から得られる柔軟性指数や破壊エネルギーは、再生骨材の老朽化や配合率の増加に伴い一様に低下する傾向を示し、再生骨材の影響を加味した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、この破壊エネルギーによる評価方法は、圧裂試験でも応用できることを確認し、汎用的な評価手法も見出した。

第 2 の評価方法は、高温域で発生するわだち割れを検証する目的として、「2 点繰り返し曲げ試験 : Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens : EN12697-24」を用いて高温条件(40°C)の疲労試験を実施し、混合物の脆化の影響を評価した。

第 3 の評価方法は、アスファルト混合物層の下面に引張ひずみが繰り返し作用することで発生する疲労ひび割れを検証する目的として、SCB 試験と応力制御で疲労試験が可能な Nottingham Asphalt Tester: BS EN 12697-24 を組み合わせた疲労試験を考案し、低温条件(10°C)の疲労抵抗性を評価した。

上述 2 種の疲労試験は、いずれも再生骨材の老朽化や配合率の増加に伴い、一様に疲労破壊回数が低下する傾向を確認し、再生混合物の疲労ひび割れとわだち割れの現象を評価できる方法を見出した。また、老朽化の影響を定量評価できたことにより、再生骨材の配合率を低下することで再生混合物の品質を確保できる可能性を示唆した。

第4章では、再生用添加剤が再生骨材内部に浸透する状態について着目し、再生用添加剤を常温で添加した後に養生期間を延長する製造方法（事前添加方式）について、再生混合物の品質向上効果を検証した。

この結果、添加後3日以上養生期間を経た再生骨材を使用した場合、従来の方法で製造した混合物よりもひび割れ抵抗性が20～30%、疲労抵抗性は40～50%向上することを確認し、老朽化した再生骨材を使用することで生じる再生混合物の品質低下を補う方法として有効な技術であることを提言した。

さらに、再生用添加剤の組成の影響を検証し、再生混合物のひび割れ抵抗性や疲労抵抗性の向上に関して、芳香族成分の有効性を定量的に把握した。また、添加剤の選定や添加方式を考慮することで、従来の製造方法と比較して約7倍の疲労抵抗性の向上効果が期待できることを示した。

第5章では、作業性や締固め特性の悪化が懸念される再生混合物について、施工時の粘性を改善するため、フォームドアスファルト技術と中温化効果のある新たな添加剤を併用する製造技術を開発し、その効果を実機工場で検証した。この結果、混合物温度が標準よりも約30℃が低下しても、標準温度の混合物と同等の作業性と締固め特性が得られ、老朽化した再生骨材を使用して施工する際に生じる品質低下の抑制に有効であることを示した。さらに、この製造技術は、再生骨材配合率が高い再生混合物においても効果があり、経済性に優れた中温化混合物が製造できることから、環境負荷低減にも有効な技術であることを提言した。

第6章では、各章で得られた成果を総括し、本研究の意義を示すとともに、今後の課題と展望を提示した。

目 次

第 1 章 序論

1.1	研究の背景	4
1.2	本研究の目的と目標	5
1.3	本論文の構成	6

第 2 章 既往の研究

2.1	アスファルトの劣化とその評価に関する研究	11
2.2	再生用添加剤に関する研究	12
2.3	アスファルト混合物の劣化評価と再生混合物に関する研究	13
2.4	再生アスファルト舗装の供用性に関する研究	15
2.5	再生骨材の性状と評価試験方法に関する研究	16

第 3 章 再生混合物の力学性状を評価する試験方法

3.1	緒言	23
3.2	既往の評価試験方法	24
3.3	再生混合物の力学特性の評価方法	26
3.4	再生アスファルトの温度と性状	28
3.5	再生混合物の製造方法	30
3.6	試験結果	34
3.6.1	従来の評価方法(圧裂試験)	34
3.6.2	常温域における評価方法	36
3.6.3	高温域における評価方法	46
3.6.4	低温域における評価方法	49
3.7	再生用添加剤および新規アスファルトの影響	53
3.7.1	再生用添加剤の添加量の影響	53
3.7.2	アスファルト量の影響	55
3.7.3	新規アスファルトの種類の影響	57
3.8	結論	59

第 4 章 再生用添加剤の組成と添加方法が混合物に及ぼす影響

4.1	緒言	63
4.2	再生用添加剤の組成が混合物性状に及ぼす影響の検証	65
4.2.1	実験概要	65
4.2.2	試験結果	67
4.3	事前添加方式による混合物性状	69
4.3.1	実験概要	69
4.3.2	試験結果	70

4.4	実機工場および実道における検証	73
4.4.1	検証概要	73
4.4.2	混合物の力学特性試験結果	75
4.4.3	試験施工結果	77
4.5	結論	79

第5章 再生アスファルト混合物の締固め特性と作業性の向上

5.1	緒言	83
5.2	フォームド As の適用効果	86
5.2.1	材料性状・配合およびフォームド As の製造方法	86
5.2.2	フォームド As の締固め改善効果	89
5.3	添加剤の適用効果	90
5.3.1	添加剤の選定	90
5.3.2	実験概要	90
5.3.3	試験結果	91
5.3.4	発泡補助剤の検討	92
5.3.5	締固め改善剤の検討	94
5.4	アスファルトプラントにおける検証	96
5.4.1	製造条件、配合	96
5.4.2	混合物の力学性状	98
5.4.3	スティフネス	99
5.4.4	フォームド As 混合物のひび割れ抵抗性と疲労抵抗性	101
5.5	作業性の評価	106
5.6	経済性の評価	109
5.7	結論	110

第6章 結論

6.1	結論	114
6.2	本研究の意義	117
6.3	今後の課題と展望	117

謝辞	121
----	-----

第 1 章 序 論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

わが国の道路整備は、高度経済成長期に急速に高まり、舗装率は 1955 年が 16.0%であったのに対して、1970 年には 78.5%に達している[1]。しかしながら、急速な道路整備は、道路の維持修繕も増加するため、建設廃材も増加することになり、これらの不法投棄が社会問題になったことから、1970 年には「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」が制定された。

その後、1973 年には第 1 次オイルショックに伴い、アスファルトの供給難や省資源が社会的課題となった。資源の有効利用の趨勢は、アスファルト舗装発生材に着目するようになり、その有効的な再生利用が求められるようになった[2]。

アスファルト舗装発生材の再生利用に関する研究は、1970 年代の中頃から始まり[3][4]、1980 年代には、舗装の再生利用の技術基準に関する指針案が発刊されたことから[5][6][7][8][9]、再生技術が確立し、今日では一般的な技術として普及している。

ここで、年度別のアスファルト混合物の製造数量を図-1-1 に示す[10]。これによると、全合材製造数量に占める再生アスファルト混合物（以下、再生混合物）の割合は、1985 年では 5%未満であったが、1998 年には、50%を再生混合物が占めており、その後さらに再生混合物の割合は増加し、現代では全合材製造数量の約 75%を再生混合物が占めている。舗装の更新周期を仮に 10 年とし、上述した再生混合物の適用割合から概略の再生回数を試算すると、2008 年には全合材数量の約 36%が 2 回目の再生利用をおこなったことになり、2018 年には約 27%が 3 回目の再生利用を行ったことになる。

また、再生骨材配合率は、1994 年では 29.9%であったものが、2014 年には 49.3%まで増加しており[10]、再生骨材の配合割合の観点においても繰り返し再生利用される確度は、近年に急激に上昇していることが分かる。

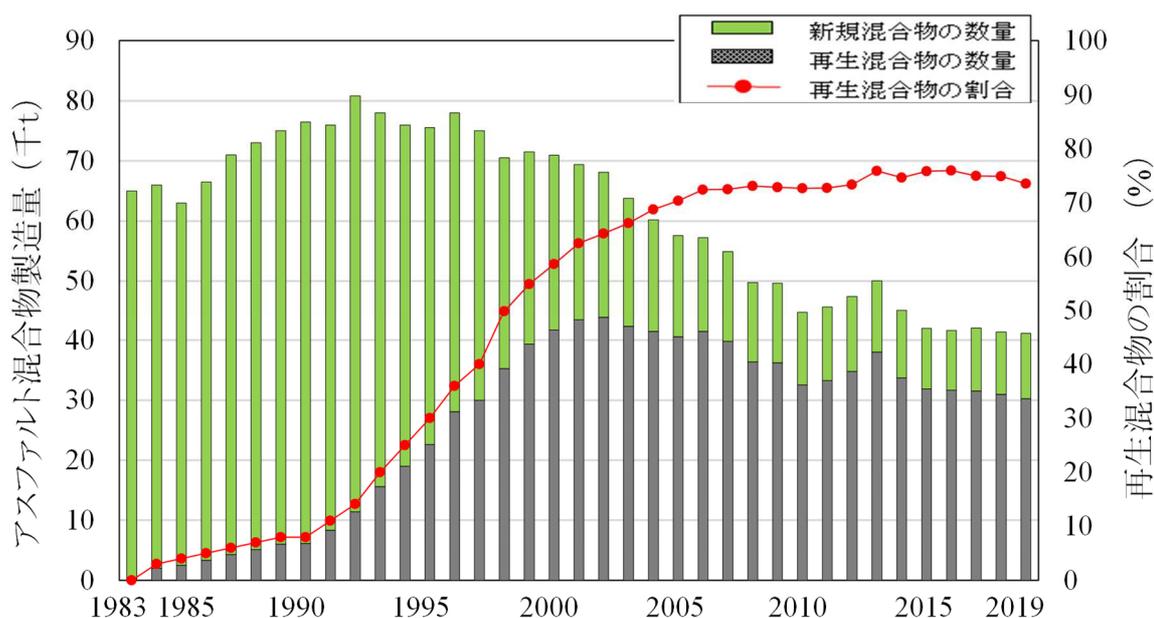


図-1-1 日本のアスファルト混合物製造数量と再生混合物の割合

再生骨材の劣化進行に関する調査は、(社)日本アスファルト合材協会において実施されており、1992年の調査では全国の針入度の平均は、32程度で1987年の時と比較すると針入度が1程度低下している[11][12]。1998年の調査では針入度の平均は31程度となり、1992年と比較して針入度が1程度低下した報告がある[13]。

しかし、2007年の調査では全国の針入度の平均は23程度まで低下している報告[14]があり、近年において急激に針入度が低下している傾向が確認されている。

図-1-2は、日本アスファルト合材協会が2007年に取りまとめた全国の再生骨材の針入度であるが、1983年は針入度が15~49(1/10mm)の範囲で最も頻度が高いものは25~29(1/10mm)であったものが、2007年には10~39(1/10mm)の範囲に低下し、さらに最も高い頻度は20~24(1/10mm)に低下している。

過度に劣化した再生骨材を使用した再生混合物は、品質低下が懸念されるため、舗装再生便覧では、再生骨材の針入度に関して規格値(針入度20以上)が定められている[15]。したがって、再生骨材の管理の観点では、規格値を下回る確率が高くなることから、管理頻度を高める必要があるが、アスファルトの回収試験には有害性のトリクロロエチレンを使用するため管理条件が厳しく、安易に頻度を高めることは難しい。

再生骨材の劣化程度を推定する方法として、「再生骨材のアスファルト針入度推定試験方法：舗装調査・試験法便覧(B017T)」があるが、精度向上が望まれる。

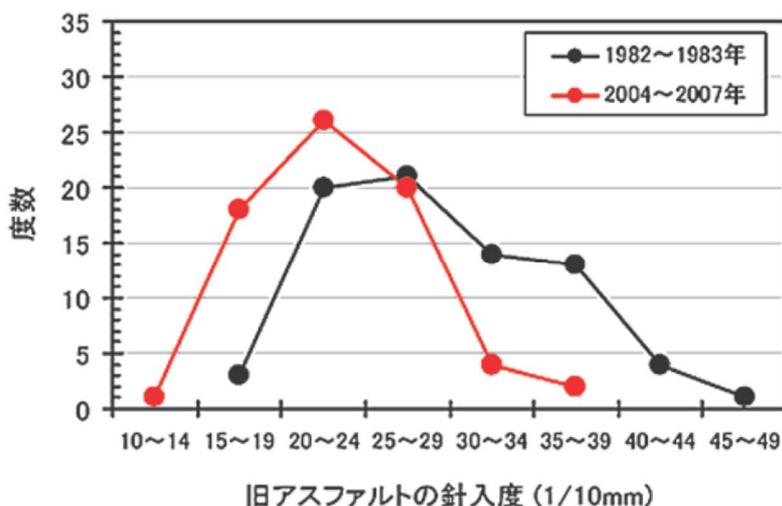


図-1-2 再生骨材に含まれる旧アスファルトの針入度の推移[14]

このように資源の少ないわが国において再生骨材の有効利用は不可欠であるが、繰り返し再生を行うことで、再生骨材中に含まれる旧アスファルトは、確実に劣化が進行している。

このため、リサイクルを繰り返すことで、規格値を満足しない再生骨材が増加することが考えられ、この傾向が続いた場合は、これまでと同様の配合割合を維持したリサイクルが困難になるおそれがある。

このことは建設廃材の増加に伴う処分地の確保や新材使用割合の増加による建設コ

ストの増加に結び付くため、資源の少ないわが国において、効率的な道路の維持管理を勘案すると骨幹を揺るがす大きな課題であり、早急な対応が必要な状況になっている。

また、現在の再生混合物に関する技術基準は、35年程前に策定されたものであり、前述した再生骨材配合率の増加や繰り返し再生による再生骨材の劣化を勘案すると大幅な改定を必要とする時期を迎えている。

また、再生骨材の劣化程度や配合率は、再生混合物の力学特性に影響を及ぼすと考えられるが、再生混合物の評価基準には、マーシャル特性値の他は圧裂係数が記載されているだけであり、再生混合物を適切に評価する方法がなく、評価基準も定められていない。したがって、未解明である混合物の評価方法や配合設計方法を確立し、評価基準を制定することで、再生骨材の劣化程度に応じた適切な活用方法を見出すことが喫緊の課題であると言える。

一方、2015年9月の国連サミットにおいて採択されたSDGs(Sustainable Development Goals)では、持続可能な国際社会の目標として、17のゴールと169のターゲットが設定された。道路舗装は社会の基盤となるインフラ施設であり、この17のゴールの中で、目標9[インフラ、産業化、イノベーション]と目標11[持続可能な都市]に大きく関与している。

道路の便益は、社会における基本的な機能である移動や運搬を確保するだけでなく、食料や医療物資の供給や医療や防災にも関与し、極めて多様な影響をもたらす。特にアスファルト舗装は、わが国の道路舗装の95%以上を占めており、その機能を継続的に確保することは、わが国の安心・安全な社会を形成する上で必要不可欠である。

資源の少ないわが国において、過去40年に渡って行われてきたアスファルト舗装の再生利用は、まさにSDGsの思想と共通するものであり、今後も持続させる必要があるが、再生骨材の品質低下により、それが困難になりつつある。

本研究はこの様な喫緊の課題を解決し、社会基盤の維持を目標としたものであり、幅広く社会に持続的に貢献できるものと考えている。

また、近年では、ESG(Environment Social Governance)で示される様に、企業には社会活動や環境保全への貢献も重視されている。本研究は既存資源を繰り返し活用することで、新たな資源の削減にも寄与し、温室効果ガスの低減に貢献できるものである。

1.2 本研究の目的と目標

本研究は、再生混合物の評価方法が確立していない現状を踏まえ、再生混合物の力学特性を適切に評価する試験方法を見出すことを目的とする。また、繰り返される再生利用によって再生骨材の老朽化が進行していることや今後も高い配合率で用いられることが考えられるわが国の実状を鑑み、再生混合物の品質を向上させる技術を開発することを目的とする。

これらの研究により、アスファルト舗装の持続的な再生利用技術を確立することを本研究の目標とするものである。

本研究の具体的な実施内容は、下記に示すとおりである。

- ①本研究では、再生骨材の劣化程度や配合率の違いが再生混合物に与える影響を評価できる試験方法が、現状に見当たらないことから、これらを見出す研究から開始する。

再生骨材は老朽化が進行していることから、このことが影響を及ぼす特性として、特に再生混合物の疲労抵抗性やひび割れ抵抗性に関して評価できる試験方法を見出す。

この試験方法により、再生骨材の劣化程度が再生混合物の力学特性に対する影響を定量的に判定できるようにする。あるいは、再生骨材の配合率が再生混合物の力学特性に対する影響を定量的に判定できるようにする。

- ②さらに、本研究では、老朽化した再生骨材（針入度が20未満の再生骨材）の有効利用を行うために、再生混合物の品質を向上させる技術について研究する。

本研究では、以下に示す3つの方法について、実験的に確認し、有効な方法を実機工場によって検証することで品質向上の技術を確立する。

◆再生用添加剤を添加した後の養生時間が再生混合物の力学特性に及ぼす影響を確認することで、従来の製造方法よりも力学特性が向上する再生混合物の製造方法を見出す。

◆再生用添加剤の組成や添加量が、再生混合物の力学特性に及ぼす影響を確認することで、力学特性に優れた再生混合物が得られる再生用添加剤を把握する。

◆再生骨材の劣化により増粘したアスファルトの影響で再生混合物の締固め特性が低下した場合に、これを改善し品質を向上させる方法について研究する。

具体的には、フォームドアスファルト技術や施工性改善剤を用いた場合の締固め特性および作業性の改善効果を確認し、再生混合物の品質向上効果を把握する。

1.3 本論文の構成

本論文の体制は、図-1-3に示すとおりであり、6つの章により構成されており、各章の内容は以下に示すとおりである。

第1章 序論

本章では、アスファルト舗装の再生利用に関して、わが国の社会背景を踏まえた上で、「研究背景」および「研究の目的と目標」について示した。また、本論文の構成について、各章の概要を記した。

第2章 再生技術に関する既往の研究

本章では、アスファルトの劣化に伴う性状変化や、これを評価する従来の試験方法に関する既往の研究について示した。また、アスファルトの劣化性状を判定する目的や研究のためにアスファルトを促進的に劣化させる方法に関して既往の研究内容を示した。

また、老朽化したアスファルトを回復させる方法として、再生用添加剤に関して国内外の研究内容を示した。

次にアスファルト混合物に関して、劣化に伴う混合物性状の研究や再生混合物の力学特性に関して、国内外の研究内容を示した。

再生混合物の供用性、あるいは力学特性や再生用添加剤の影響などに関する既往の研究内容を整理し、再生利用を持続するための課題を示した。

第3章 再生混合物の力学性状を評価する試験方法に関する研究

本章では、最初に、わが国における既往の評価方法（圧裂試験および曲げ疲労試験）の適否を確認した。その上で、第2章で調べた国内および海外の評価方法を参考に、再生骨材の劣化程度や配合率が再生混合物に及ぼす影響を定量的に評価できる試験方法について室内において実験的手法により検証した。

再生混合物の評価項目としては、老朽化再生骨材の影響を加味して、特に、疲労抵抗性やひび割れ抵抗性に着目して試験方法を選定した。本研究では、再生混合物は温度域に応じて新規混合物とは異なる粘弾性になると考え、力学特性を3つの温度域で評価した。

さらに本章では、新たに見出した再生混合物の評価方法を用いて、再生用添加剤の添加量、再生混合物の総アスファルト量およびアスファルトの種類が再生混合物に及ぼす影響に関して評価した。

第4章 再生用添加剤の組成や添加方法が混合物に及ぼす影響に関する研究

わが国の再生混合物の配合設計は、再生骨材をアスファルトの回収試験方法（舗装調査・試験法便覧：G029）により、回収したアスファルトに再生用添加剤を添加して目標の針入度に調整する。しかし、実際のアスファルト混合物の製造工場（以下、合材工場）では、再生骨材に再生用添加剤を直接散布する方法が行われている。

また、再生骨材内部への再生用添加剤の浸透状態は時間経過に伴い変化し、このことが混合物の力学特性に影響すると考えられるが、被膜や浸透状態の影響に関して検証した事例は少ない。

そこで、本章では、再生用添加剤を添加した後の養生時間を延長し、養生時間が混合物の力学特性に及ぼす影響を検証した。また、わが国では、再生用添加剤の組成に関する規格が無いいため、様々な成分を含む再生用添加剤が市販されている。このため、再生用添加剤の成分の違いが再生混合物の力学特性に及ぼす影響についても併せて検証を行った。検証方法は、第3章で選定した3種の評価方法を用いることで、再生用添加剤の添加方式と添加剤種が再生混合物のひび割れ抵抗性や疲労抵抗性に及ぼす影響について比較し、併用した場合の効果についても確認した。

第5章 再生混合物の締固め特性と作業性を改善する技術に関する研究

一般的に再生骨材中に含まれる旧アスファルトは、劣化の進行や改質アスファルトの影響により、粘性が増加している。このため、新規混合物と比較すると、施工時の締固め特性や作業性が低下することが想定される。混合物の締め固めを適切に行うことは、混合物の力学特性に大きく影響するため、舗装の耐久性確保の観点では締固め度を確保することが重要となる。加えて良好な作業性は、舗装表面の肌理を細やかにし、水密性や飛散抵抗性を確保するのに重要である。このため、再生混合物の施工時の締固め特性や作業性を向上する方法について研究を行った。

アスファルトの粘性を一時的に低減し、舗装施工時の締固め特性や作業性を向上する従来の方法としては、中温化技術とフォームドアスファルト技術がある。

中温化技術は、アスファルトの粘性を低減する薬剤を添加する方法であり、全ての混合物に適用が可能であるが、薬剤の費用や投入費を要するため経済性が課題となっている。経済性に優れた技術としては、フォームドアスファルトがあるが、新規アスファルトに適用する技術であるため、再生混合物では、再生骨材の配合率が増加すると新規アスファルト量が低減するため効果が低下する課題がある。

このため、本研究では、経済性と再生混合物の品質向上を両立するため、中温化効果のある薬剤とフォームドアスファルトを併用する技術について研究した。

本章では、従来から使用されている添加剤よりも針入度や伸度などの向上効果が高い、高性能な添加剤を調査し、これらの混合物特性に改善効果について検証した。

第6章 結論と今後の課題

本章では、各章で得られた成果を総括し、本研究の意義を示すとともに、今後の課題と展望を提示した。

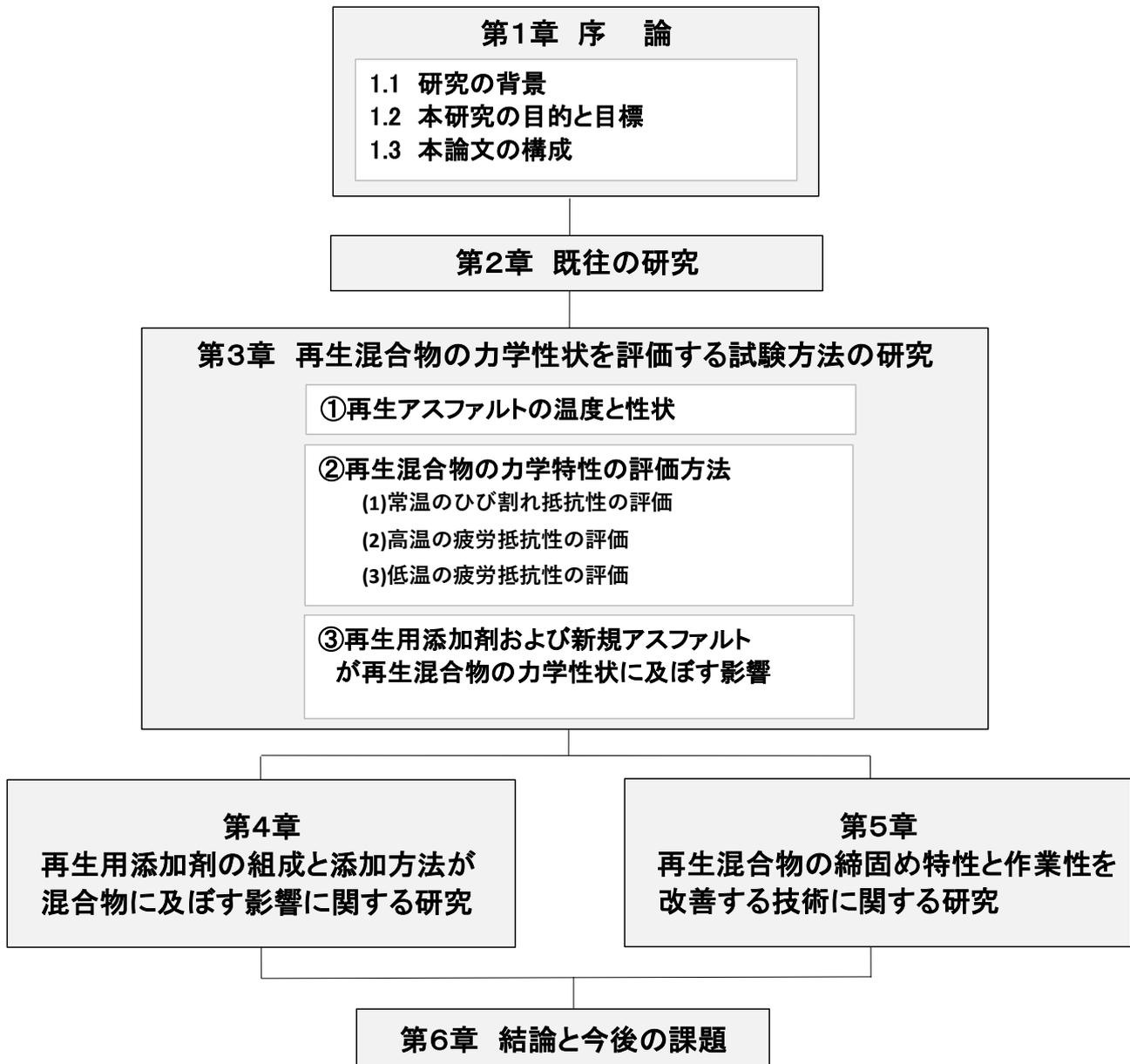


図-1-3 論文の構成

【第1章の参考文献】

- [1]全国道路利用者会議：道路統計年報,2020,国土交通省
- [2]河野宏,吉兼秀典：舗装廃材の再生利用の現状について,土木学会論文集,第390,1998.2
- [3]日本舗道（株）：アスファルト舗装の再生利用技術に関する研究報告.1977
- [4]建設省道路局国道第一課,建設省土木研究所：舗装廃材の再生利用に関する研究,第36回建設省技術研究報告,pp265-329,1983.9
- [5]（社）日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針（案）,1984
- [6]（社）日本道路協会：プラント再生利用技術指針（案）,1984
- [7]（社）日本道路協会：路上再生路盤工法技術指針（案）,1987
- [8]（社）日本道路協会：路上表層再生工法技術指針（案）,1988
- [9]（社）日本道路協会：プラント再生舗装技術指針,1992
- [10]（一社）日本アスファルト合材協会：合材統計年報,2020
- [11]再生アスファルト舗装の供用性,舗装,1990.12
- [12]一般社団法人日本アスファルト合材協会：アスファルトコンクリート再生骨材及び再生加熱アスファルト混合物における製造並びに品質に関するアンケートによる実態調査結果,1993.3
- [13]一般社団法人日本アスファルト合材協会：舗装発生材および再生合材に関する実態調査報告書,2000.7
- [14]新田弘之,佐々木巖,西崎到,川上篤史,久保和幸：アスファルト・コンクリート塊の持続的リサイクル,土木技術資料,53-4,2011
- [15]公益社団法人日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年度版）,PP.11

第 2 章 既往の研究

第 2 章 既往の研究

2.1 アスファルトの劣化とその評価に関する研究

アスファルトは、原油を減圧蒸留して精製されるものであるが、その品質は、原油の種類や製造方法によって影響を受ける。このため、1985年には、建設省土木研究所において調査研究がおこなわれ、アスファルトの品質変化に関する評価が行われている。

この結果からは、原油の処理方法や製造方法を画一化することで、アスファルトの品質変化は収束する傾向であることが示されている[1][2][3][4]。

しかしながら、近年では、原油の処理過程を確認する工程は少なく、原油をブレンドする場合も考えられるため、アスファルト混合物の品質評価を行うには、現状のアスファルトの品質実態を調査する必要があると考えられる[5]。

アスファルトの劣化は、熱や酸素、あるいは紫外線などによって、基本組成である炭化水素が高分子化する現象である。アスファルトの組成は、飽和分、芳香族分、レジン分、アスファルテンの4成分に分類され、その割合は劣化に伴い、飽和分と芳香族分が減少し、レジン分とアスファルテンが増加する傾向を示す[6][7]。また、アスファルトの物理性状は、劣化に伴い、針入度や伸度が低下し、軟化点が増加する傾向を示し、硬質化、脆化する傾向を示す。針入度が過度に低下するとアスファルト混合物は脆化し、混合物の性状が低下する場合と考えられている[8][10][11][12]。

このため、舗装再生便覧においては、舗装発生材を再生骨材として、再生アスファルト混合物に使用する場合は、再生骨材中に含まれるアスファルトの針入度が20(1/10mm)以上であることが再生骨材の品質規格として定められている[9]。

アスファルトの劣化は、混合物の製造においてアスファルトを加熱溶解するため、この過程で熱劣化が進行する。熱劣化は混合物製造直後から始まり、施工が終了して混合物の温度が低下するまで劣化が進行する。

アスファルトの貯蔵や製造における劣化を評価する試験方法としては、薄膜加熱試験方法、蒸発質量変化率試験方法、蒸発後の針入度比試験方法などがある[13]。

薄膜加熱試験は、アスファルトが薄膜状態で加熱作用(163℃5時間)を受けるため、アスファルト混合物を製造する際にアスファルトが受ける劣化を再現しているとされている[14][15][16][17]。

これに対して、蒸発質量変化率試験方法および蒸発後の針入度比試験方法は、アスファルトを貯蔵している間に軽質分が揮発することによる品質変化を評価するものであり、アスファルトの品質規格となっている[18]。

海外のアスファルトの品質および劣化に関する評価試験としては、ヨーロッパでは、The European Committee for Standardization(CEN)によって、EN12591が舗装用アスファルトの規格として1999年に策定されている。

これに対して、米国では、カルフォルニア州道路局において、回転式薄膜加熱試験が行われている。日本の薄膜加熱試験方法と比較すると、日本の試験方法が膜厚3mm、加熱時間5時間に対して、米国は膜厚5~10 μ m、加熱時間75分で行っており、短時間で促進的に劣化作用を与える試験方法を採用している。

しかしながら、これらの試験方法により強制的にアスファルトの劣化を促進させることができるものの、供用時に発生するアスファルトの劣化を再現することができな

いと考えられている[19].

また、米国では、新たな配合設計方法である **Superior Performance Pavement (SUPERPAVE)**において、**Performance Grade(PG)**が設定され、適用される地域の舗装体温度によってアスファルトの針入度グレードが選定される設計方法となっている[20].

この中では、アスファルトの促進劣化を評価する方法として、**Pressure Aging Vessel(PAV)**が採用されている。また、劣化アスファルト評価方法として **PAV** 後のアスファルトについて、**Dynamic Shear Rheometer test(DSR)**および **Bending Beam Rheometer test(BBR)**を行うことによって、供用に伴うアスファルトの劣化を評価している[21][22][23].

2.2 再生用添加剤に関する研究

再生用添加剤は、老化したアスファルトの機能を回復する目的で使用されるものでアスファルト混合物の再生において重要な役割を持つ。米国では、この様にアスファルトの性質を変えるものとしては、軟化剤(**Softening Agent**)、若返り剤(**Reclaiming Agent**)、改質剤(**Modifier**)、再生添用加剤(**Recycling Agent**)、フラックスオイル(**Fluxing Oil**)、増量油(**Extender Oil**)、アロマチックオイル(**Aromatic Oil**)などがあり、**Pacific Coast User-producer Group**では、再生用添加剤はバージンアスファルトとの仕様を満足する性状を持つ炭化水素化合物と定義している[24].

しかし、物理的な性能を裏付けに再生用添加剤の品質について検討が始まったのは、最近になってであり、**Dunning**と**Mendenhall**はアスファルト中のアスファルテンの分散性を重視して再生用添加剤の成分について提唱している[25]. また、**Davidson**らはアスファルトの耐久性を確保する再生用添加剤について化学成分の観点から言及している[26].

わが国の再生混合物の配合設計では、劣化したアスファルトを軟質化させ、新規アスファルトの組成に近づけるために、再生用添加剤を添加することで設計針入度に調整する設計手法が取られている[27].

再生用添加剤が劣化アスファルトの性状に及ぼす影響を検証した研究は、1970年台から行われており、再生用添加剤の添加量とアスファルトの物性の関係やアスファルトの組成への影響などが示されている[28][29][30][31][32].

また、再生用添加剤の物性値に関しては規格が定められているが[33]、成分については規格がないため、芳香族系、ナフテン系、パラフィン系などのベースオイルの種類が劣化アスファルトに及ぼす影響も研究されており、芳香族系の成分が多いほど、アスファルトの伸度の回復効果が高いことが記されている[28].

アスファルトの伸度は舗装のひび割れ率との関係が深く、伸度が10cm以下となると、舗装のひび割れ率が大幅に増加するとされている[34].

また、アスファルトの物性を伸び量と荷重から評価した実験的研究事例もあり、伸度を回復させるために再生用添加剤を多量に添加した際の課題を提言している[35].

2.3 アスファルト混合物の劣化評価と再生混合物に関する研究

米国におけるアスファルト混合物のリサイクルの現状は、National Asphalt Pavement Association(NAPA)が1999年に開催したセミナーで詳細に示されている。

ここでは、各州によって再生骨材配合率は異なるものの、おおよそ30%未満で適用される場合が多く、再生骨材配合率が増加すると混合物のスティフネスが高くなり、この結果、舗装のひび割れ破損が増加する傾向があることが示されている。特にアリゾナ州では、再生骨材配合率を50~100%に増加した場合に、疲労ひび割れが明らかに増加し、このため、多くのメンテナンスを行った報告がある[36]。

配合設計方法に関しては、Federal Highway Western Administration(FHWA)において再生混合物の配合設計手法[37]が確立されていたが、1993年にSUPERPAVEの配合設計方法が導入されたことから、再生骨材を適用する場合の課題についても示されている。ここでは、再生骨材のバラツキによる骨材間隙率(VMA)が変動、再生骨材の特性を補うアスファルトグレードの選択、細粒分と有効なアスファルトの比率、製造方法などに関して課題が挙げられている。

供用状況の実態としては、再生混合物は比較的早期にひび割れ損傷が発生していることから、再生骨材配合率に応じて使用するアスファルトグレードを変える方法が行われており、具体的には気候や交通量に応じて各州で異なる手法が取られている[38]。

次にわが国における再生混合物の既往研究について示す。

アスファルトは、製造時の加熱劣化や供用中の雨水による剥離や酸化劣化などの作用によりアスファルトは劣化しその性状は大きく変化する。このように製造・環境・交通条件などの多様な影響要因があるため、アスファルト舗装の劣化程度を予測することは難しい。

このため、アスファルト混合物の劣化評価を実験的に検証した研究が多く行われている。

再生用添加剤の添加量と再生混合物の力学性状に関して検証した研究では、再生用添加剤の影響は、混合物が老化した後に現れてくることや、新規混合物と比較して再生混合物は、スティフネスが高くなり、曲げ試験時の破断ひずみが低下する傾向が認められている。

また、繰返し曲げ試験では新規混合物と比べて再生混合物は破壊回数が増加する傾向が確認されている[39][40][41]。このため、実路の供用状態と合致しない傾向であることから、曲げ疲労試験による再生混合物の評価が難しいと考えられている。

また、バージンアスファルト混合物を高温の恒温槽で促進的に加熱劣化させた研究では、混合物を強制的に劣化させることで疲労抵抗性が低下することが確認されている[42]。

再生用添加剤の組成が混合物の力学性状に及ぼす影響は、飽和分、芳香族分、レジン分の組成が異なる再生用添加剤を使用して再生混合物のスティフネスや曲げ強度特性に関して比較検証を行い、再生用添加剤の種類によって必要となる添加量が異なることを見出している[43]。

さらに芳香族成分が多い添加剤を使用した場合は、同一針入度にするための再生用添加剤添加量が増加し、低温時の曲げ破断ひずみが低い傾向があることを確認している。一方で飽和分の多い添加剤は老化に伴い、曲げ強度が低下することを確認されて

おり、総じて再生用添加剤の組成としては、芳香族分を多く含む再生用添加剤が優れて添加剤と考えられている[44].

また、加熱による劣化ではなく、耐候性に関する研究としては、促進耐候性試験機を用いて混合物表面を促進劣化させた研究が行われており、紫外線による劣化が混合物の曲げ強度特性に影響を及ぼすことが検証されている[45][46].

一方で、実路において供用したアスファルト舗装について、深さ方向の化学的性状を赤外線吸光分析や組成分析によって検証した研究事例がある。ここでは、アスファルトの劣化は舗装表面からだけではなく下面からも劣化が進行することが確認されている[47].

再生利用を繰り返した際の影響に関する研究では、再生履歴や劣化履歴が把握できる試料を確保することが困難であることから、室内で強制的に劣化させた試料を再生骨材と見立てて、実験的研究を行っている。

加圧促進劣化試験(PAV)により促進劣化した研究では、繰り返し再生をすることで曲げ試験時の破断ひずみが低下し、アスファルトの劣化に伴う脆化の影響が試験結果から確認されているが、曲げ疲労試験では再生混合物の破壊回数が増加する結果が得られており[48]、実路の傾向と異なることから、曲げ疲労試験では、アスファルトの劣化の影響を適切に評価できないと考えられている。

また、薄膜加熱試験(TFOT)により促進劣化した研究では、旧アスファルトの伸度は、2回目以降の再生で、舗装用石油アスファルトの規格を満足しない可能性があり、これを満足させるためには再生用添加剤の選定が重要であることを示している。

また、再生用添加剤の選定には、伸度向上が高い添加剤が有効であると提言している[49][50].

交通量の増加に伴う流動わだち掘れの対策として、わが国で改質アスファルトが活用されるようになったのは、1988年にアスファルト舗装要綱に一般材料として掲載されて以降[51]である。このため、再生骨材にも改質アスファルトを含む可能性があり、この影響について研究した結果では、改質アスファルトの再生骨材の割合が増加するほど動的安定度は増加し、曲げ試験の破断ひずみは50%程度までは新規混合物と同等であるが、それ以上の割合では破断ひずみが増加する傾向を確認している。

このため、改質アスファルトの再生骨材を使用する場合は、20~50%が適当と結論付けている[50][52][53].

2.4 再生アスファルト舗装の供用性に関する研究

実路において再生アスファルト舗装の供用性状を確認した事例は、1967年（昭和42年）に国道16号線幕張地区で行われた試験舗装が報告されている[54][55][56][57].

ここでは、実路において表層に適用された舗装のアスファルト性状と舗装破損形態について調査し、針入度が40以下、あるいは伸度が10cm以下になった場合に、ひび割れが急速に進行する結果が確認されている。しかし、全ての結果について、アスファルト性状と舗装破損の関係が一致しておらず、他の要因も複雑に影響していると考えられている。

1978年（昭和53年）には、名古屋市道において交通量がB交通とC交通の路線で行われた試験舗装が報告されている[58][59][60]. ここでは再生混合物を表層、基層、アスファルト安定処理層に適用した舗装の路面性状について10年間の追跡調査を行っている。再生骨材配合率は表層（密粒度13：50%）、基層（粗粒度20：60%）、アスファルト安定処理層（70%）であり、最適アスファルト量を新規混合物より、0.2～0.4%高めた配合とした。その結果、ひび割れは皆無であり、わだち掘れも少なく良好な供用性を確認した。

しかし、再生混合物の針入度は低下しており、ベンゲルマンビームよるたわみ量も供用初期に低下する傾向が認められた。

さらに同年1978年には、横浜市と川崎市でも再生混合物の試験舗装が行われ、いずれの試験施工も再生舗装は新規舗装と大きな差異はないものの、たわみ性が低いなど、同様の傾向が認められてる報告がされている[61][62].

東京都でも1980年（昭和55年）に試験舗装が実施され、基層に再生混合物を適用した報告がある[63]. ここでは、供用4年後に急激にひび割れが進行したが、ダイナフレクトたわみ量の差異は認められず、その原因は再生混合物の材料品質の不均一を判定された。

また、東京都では、2012年に高針入度アスファルトにより針入度調整を行った試験舗装を主要地方道青梅入間線（青梅市）で行っている[64]. 新規混合物、再生用添加剤で針入度調整、高針入度アスファルトで針入度調整を2種類実施しているが、供用性状は大きな差異が無い事が確認されている。

建設省では1982年（昭和57年）から1983年（昭和58年）にかけて直轄国道に試験舗装を行った報告がされている[10][65][66][67]. 調査対象は全国の96箇所の試験舗装について追跡調査を行った結果、再生骨材のアスファルト針入度が20未満の場合は、再生後も針入度回復が十分ではなく、供用後にひび割れが大きい傾向が認められた。

しかし、アスファルトの劣化メカニズムから、舗装の耐久性や劣化・破損に関して一貫して研究した事例は少なく、未知の部分が多い。

2.5 再生骨材の性状と評価試験方法に関する研究

再生骨材の劣化進行に関する調査は、(社)日本アスファルト合材協会において実施されており、1992年の調査では全国の針入度の平均は32程度で1987年の時と比較すると針入度が1程度低下している[66][68]。1998年の調査では針入度の平均は31程度となり、1992年と比較して針入度が1程度低下した報告がある[69]。

しかし、2007年の調査では全国の針入度の平均は23程度まで低下している報告[70]があり、近年において急激に針入度が低下している傾向が確認されている。

このため、再生骨材中に含まれるアスファルトの針入度が規格値(20以上)を満足しない再生骨材の割合が増加することが懸念されている。

規格外の再生骨材を使用した場合に再生混合物の力学性状に及ぼす影響としては、合材工場から採取した再生骨材について、さらに室内で促進劣化を行い、針入度が15~20レベルと、針入度が10~15レベルに試料を作製し、直接引張試験で検証した事例がある[71]。この結果からは、針入度レベルが低下するほど、引張強度は高く、破断ひずみは小さくなる傾向が確認されている。また、再生骨材配合率が増加するほど引張強度は高く、破断ひずみは小さくなる傾向がある。但し、アスファルト量によっては、傾向が逆転するものや再生骨材配合率が50%以上の結果が含まれていない点については今後の確認が必要である。

また、別の研究事例としては、規格内と規格外の再生骨材について、間接引張試験、直接引張試験、繰り返し曲げ試験を行っている[72]。この研究からは、前述の傾向と同様で、規格外再生骨材を使用した方が、引張強度は高く、破断ひずみは小さくなる傾向が確認されている。また、再生骨材配合率が増加するほど引張強度は高く、破断ひずみは小さくなる傾向がある。しかし、繰り返し曲げ試験による疲労抵抗性は、規格外の再生骨材を適用した方が、破壊回数が大きく、再生骨材配合率が増加するほど破壊回数が増加する傾向が確認された。

この結果は、単純载荷試験と繰り返し载荷では傾向が逆転しているものであり、この様なアスファルト混合物の疲労特性に関して、疲労試験の方法や試験条件の影響について研究しており、ここでは载荷時間や試験温度の影響や载荷休止時間の影響などを検証している[73]。

(国研)土木研究所においても、劣化アスファルト舗装の再生利用に関して研究を行っている[74][75]。ここでは、再生骨材配合率を変えた混合物を再生と促進劣化

(110℃の恒温槽で加熱促進劣化)を5回繰り返し、圧裂試験や曲げ試験を実施している。この結果、回収アスファルトの針入度と圧裂係数に相関が高いこと、曲げ試験では再生骨材配合率60%において、再生3回目以降で脆化点が低温側に移動する傾向が確認され、新規アスファルト混合物とは差異があることから、再生骨材の配合率は少ない方が望ましいと結論付けている。

また、低針入度再生骨材を使用した試験舗装では、わだち掘れが大きい傾向があり、針入度を調整するために多量に添加した再生用添加剤の影響と判断している。

さらに、針入度調整にオイル系の再生用添加剤を使用した場合は、繰り返し再生を3回以上行くと、軟化点が急激に増加する傾向があることが確認されている。

再生骨材の劣化進行に伴い再生用添加剤の添加量が増加することから、再生用添加剤が大きく影響するため、この研究以降、再生用添加剤の組成が、繰り返し再生した際の混合物性状に及ぼす影響について研究が、土木研究所や日本大学などで行われている。加納らは飽和分を主とする添加剤と、芳香族を主とする添加剤について検討し、い

ずれの添加剤も再生回数の増加に伴い圧裂係数が増加するが、飽和分主体の方がその傾向が顕著であることを確認している。また、曲げ試験による破断ひずみは、飽和分主体の方が、再生回数と再生骨材配合率が多くなるほど大きくなる傾向が確認された。

なお、動的安定度は再生回数が増えると増加するが、添加剤の組成によって差異が無い事も確認している[76]。また、フーリエ変換型赤外分光光度計(FT-IR)を用いて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)を測定した結果からは、再生骨材配合率が高い(60%)場合に再生回数の増加するほどカルボニル基が増加し、繰り返し再生により酸化物が蓄積される傾向があることが確認されている[77]。

繰り返し再生に伴う分子量を測定した結果では、再生を繰り返すことにより、新規混合物と比較すると分子量が大きい成分が増加する傾向があり、飽和分主体の添加剤の方が、その傾向が顕著であることが判明している[77][78]。

その後、土木研究所が行った研究では、再生用添加剤を5種類に増加して同様の検討を実施し、上述した傾向を再検証している。この中で判明した事柄は、芳香族成分が多い添加剤は繰り返し再生に伴うアスファルトの性状変化が少なく、芳香族成分の割合は、軟化点や伸度と高い相関があることが確認されている。

次に再生混合物の力学特性の評価が、従来の試験方法では判定が難しい場合があるため、新たな評価方法が研究されている。その1つは、60°Cで実施する高温カンタプロ試験であり、再生アスファルトが劣化し硬質化する状態を評価する方法として検討されている。その結果は、再生を繰り返すことでカンタプロ損失率が増加し、飽和分が多い添加剤を使用した場合に損失率が増加する傾向が確認されている[79]。これらを再生用添加剤の種類を変えて検証すると、再生アスファルトの軟化点が60°C以上、あるいは飽和分が36%を下回るとカンタプロ損失率が高まると提言している[80]。

再生混合物の特性として高温で硬質化する傾向が考えられるため、高温の疲労特性を検証する必要があるが、一般的に使用されている曲げ疲労試験では、試験機の構造的課題から適用が困難である。そこで、ホイールトラッキング試験を活用し、上層に供試体、下層にゴム板やバネ板を設置することで適度な変位を発生させる試験方法を考案し、40°Cにおいて繰り返し载荷試験を行った研究がされている[81][82]。

この結果、飽和成分が多い添加剤を使用すると少ない走行回数でひび割れが進行し、上記に示した高温カンタプロ損失率と高い相関があることが認められた。

以上に示したとおり、これまで再生混合物に関して膨大な研究は行われており、特定の要素が再生混合物に及ぼす影響は確認されている。しかしながら、アスファルトの劣化過程が異なることや再生用添加剤の影響、あるいは再生骨材の配合率の違いなどの様々な影響要素が複雑に関与していることから、これらが再生混合物に及ぼす影響を総合的に解明した研究は行われておらず、アスファルト舗装の再生利用を多く行っているわが国において、再生混合物の評価方法の確立は大きな課題となっている。

【第2章の参考文献】

- [1]牛尾俊介：道路用ストレートアスファルトの規格と試験法について,アスファルト Vol.31, No.157, pp.9-34, 1988
- [2]アスファルト舗装技術委員会材料開発研究分科会調査中間報告,アスファルト Vol.44, No.210, pp.20-53, 2002
- [3]牛尾俊介：道路舗装用アスファルト品質規格試験方法の検討,アスファルト,Vol.45, No.210, pp.19-22, 2003
- [4]アスファルト舗装技術委員会材料開発研究分科会：道路舗装用アスファルト品質規格に関する調査結果,アスファルト,Vol.45, No.213, pp.31-37, 2003
- [5]JX 日鉱日石エネルギー株式会社 産業エネルギー部門 産業燃料部：石油アスファルト需要動向と将来展望について,アスファルト,Vol.57, No.230, pp.1-5, 2014
- [6]アスファルトの劣化と老化,舗装,pp.11, 24-12, 1989.12
- [7]アスファルトの劣化,舗装,pp.7, 27-12, 1992.12
- [8]菅原照雄:アスファルト混合物の物性,土木学会論文集,第 348 号,V-1, pp.27-36, 1984.8.
- [9]一般社団法人日本道路協会：舗装再生便覧（平成 22 年版）,pp.145-147,2010.
- [10]安崎裕,片倉弘美,高木信幸:再生加熱アスコンの供用性評価,土木技術資料 31-9, pp.48-53,1989.
- [11]竹下春見,南雲貞夫：現場で使用されている舗装用アスファルト A,B,C 型についての室内試験結果,土木技術資料,pp.5-7,1960.
- [12]P. Hubbard and H. Gollomb: Hardening of Asphalt with Relation to Development Pavements, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.9, pp.165-194, 1937
- [13]公益社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧(A046,A047,A048),2019
- [14] 笠原靖,雑賀義夫,植村正：薄膜加熱試験によるアスファルトの熱劣化の検討(第 2 報)劣化による組成及び解こう性の変化,石油学会誌,pp.41-45,1974
- [15]松野三郎,南雲貞夫,三浦裕二,山之口浩：アスファルトに関する試験,pp.125-130,1973
- [16]笠原靖,雑賀義夫,植村正：薄膜加熱試験によるアスファルトの熱劣化の検討(第 1 報)アスファルトの熱劣化機構について,石油学会誌,pp.36-41,1974
- [17] 山之内浩：アスファルトに関する試験法,舗装,Vol.3,pp.125-130,1973
- [18]一般社団法人日本道路協会：舗装施工便覧(JIS K 2207),pp.19,2006
- [19]松野三郎,南雲貞夫,三浦裕二,山之口浩：アスファルトに関する試験,pp.157-166,1973
- [20]片脇清,新田弘之,佐々木巖,中村俊行,久保和幸：舗装用アスファルトの新しい試験方法-SHRP で提案されている品質規格,土木技術資料,Vol.35, No.9, pp.29-34, 1993
- [21]七五三野茂,鈴木秀輔,小島逸平：ヨーロッパを中心とした諸外国の SUPERPAVE への対応と規格の動向,アスファルト,Vol.42, No.201, pp.12-19, 1999
- [22]新田弘之：日本における SUPERPAVE の現況,アスファルト,Vol.42, No.201, pp.20-24, 1999
- [23]渡邊光喜,立石大作,川付正明,武田雄：米国における SHRP, SUPERPAVE の現況～現況調査～,アスファルト,Vol.42, No.201, pp.3-11, 1999
- [24]飯田章夫,栃木博：再生添加剤,舗装,pp.27-34, 1982.10
- [25]Dunning, R.L., and R.L.Mendenhall, "Design of Recycled Asphalt Pavement and Selection of modifiers", STP662, ASTM, L.E. Wood Ed., Nov., 1978
- [26]Devidson, D.D. et al., "Recycling of Substandard or Deteriorated Asphalt Pavement-A Guideline For Design Procedures", Proc. AAPT, Vol.46, 1977

- [27]公益社団法人日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年版），pp.27-31,2010.
- [28]鈴木義昭,田辺知子：再生用添加剤の再生能力と耐久性について,道路建設,pp.59-65,1990.5
- [29]野村健一郎：再生用添加剤の組成が再生合材の性状に及ぼす影響,アスファルト合材,vol161,pp.38-43,2002.1
- [30]鈴木登夫,遠藤成夫,福田正：再生アスファルトの品質評価,第21回日本道路会議,689,1995.11
- [31]佐藤元志,添谷守,林伸行：再生用添加剤の性状について,第15回日本道路会議,461,1983
- [32]野村健一郎,三田浩史,本多重範：再生用添加剤の耐久性に関する検討,第16回日本道路会議,495,1985
- [33]公益社団法人日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年版），pp.14,2010.
- [34]公益社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧(A043),2019
- [35]本山正樹,中村健：再生用添加剤を用いた劣化アスファルトの再生方法に関する研究,土木学会第71回年次学術講演会,V-024,2016.9
- [36](社)日本道路建設業協会 技術委員会 海外技術部会：Recycling Practices for HMA 加熱アスファルト混合物(HMA)のリサイクルの現状(1),道路建設,pp.36-41,2002.5
- [37]川野敏行,嘉藤信之：再生アスファルト混合物の利用,舗装,pp.23-26,1980.4
- [38]一般社団法人日本道路建設業協会 技術委員会 海外技術部会：Recycling Practices for HMA 加熱アスファルト混合物(HMA)のリサイクルの現状(3),道路建設,pp.62-69,2002.7
- [39]鈴木義昭,向後憲一：再生アスファルト混合物の力学性状について,第16回日本道路会議論文集,496,1985
- [40]菊池力斗,木村清和,高橋修,清水忠昭,田口仁：再生アスファルト混合物の疲労特性の評価方法,土木学会第73回年次学術講演会,pp.1289-1290,2018.8
- [41]三瀬貞,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研究,第15回日本道路会議,494,1983
- [42]馬淵智仁,前原弘宣,高橋修：促進劣化を施したアスファルトコンクリートの疲労破壊抵抗性に関する研究,土木学会第63回年次学術講演会,pp.75-76,2008.9
- [43]八谷好高,高橋修,松崎和博,坪川将丈：再生用添加剤が再生アスファルトの性能に及ぼす影響に関する実験的研究,土木学会論文集,No.753,V-62,pp.127-136,2004.2
- [44]高橋修,八谷好高：組成が異なる再生用添加剤を用いた再生アスファルト混合物の特性,土木学会舗装工学論文集,第5巻,pp.23-30,2000.12
- [45]永原篤,村山雅人：促進耐候性試験によるバインダおよび混合物のたわみ性の低下に関する一検討,土木学会第63回年次学術講演会,V-5,pp.71-72,2008.
- [46]永原篤,村山雅人：気象劣化に基づいたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状評価と室内再現試験,土木学会第64回年次学術講演会,V-32,pp.63-64,2009.
- [47]川島陽子,新田弘之,佐々木巖,西崎致：再生工法の異なる再生アスファルト混合物の深さ方向における化学性状の変化,土木学会論文集 E1(舗装工学),Vol.73,No.3,pp.163-167,2017
- [48]木村慎,池田拓哉,寺田剛：促進劣化による再生アスファルト混合物の評価,土木技術資料,40-12,1998

- [49]再生アスコンの再再生,舗装,pp.8-10,1988.12
- [50]Part7 再生舗装 No.13~14,舗装,pp.21-25,1996.12
- [51]一般社団法人日本改質アスファルト協会,舗装用改質アスファルトの歴史,協会ホームページ
- [52]荒井孝雄:改質アスファルト含有舗装発生材の再生利用と再生混合物の高品質化利用,舗装,pp.9-16,1994.7
- [53]荒井孝雄:改質アスファルト等を含む舗装発生材の再生について,第20回日本道路会議,785,1993
- [54]飯島尚,岩崎尚義:幕張試験舗装におけるアスファルトの老化と供用性,土木技術資料,pp.117-122,1985.
- [55]飯島尚,小島逸平,寺島憲一:アスファルト舗装用混合物の配合設計に関する幕張試験舗装の解析,土木技術資料,pp.34-39,1982.12.
- [56]小島逸平,猪股和義:幕張試験舗装調査結果,第15回日本道路会議,pp.267-268,1983.
- [57]松野三朗,谷本誠一:幕張試験舗装の概要と供用状況について,土木技術資料,pp.13-23,1970
- [58]高木俊兼,船橋弘靖,宮田孝直:長期供用した再生アスファルト舗装の路面性状,道路建設,pp.56-64,1982.2
- [59]栗山昌人,吉兼亨,大河内宝:再生加熱アスファルト舗装の耐久性と再再生について,第20回日本道路会議,784,1993
- [60]栗山昌人,吉兼亨,金田正秀,大河内宝:再生加熱アスファルト舗装の耐久性と再再生について,道路建設,pp.60-66,1994.3
- [61]反町勇,御代川邦博,大場正男,稲垣竜興:再生アスファルトコンクリートの試験施工と追跡調査,舗装,pp.11-15,1980.6
- [62]石川茂,渡辺勝,山本信明:再生アスファルト混合物の試験舗装に関する追跡調査,道路建設,pp.48-51,1982.12
- [63]内田喜太郎,小沢孝吉:再生粗粒アスファルト混合物を使用した舗装の破壊原因について,第16回日本道路会議,pp.383-384,1985.
- [64]峰岸純一,橋本喜正:再生アスファルト混合物への高針入度アスファルトの適用,平26,土木技術支援・人材育成センター年報 Annual Report,C.E.S.T.C.,TMG,pp.65-72,2014
- [65]中村俊行,久保和幸,東嶋奈緒子:アスファルト発生材の再生限界に関する試験調査,第20回日本道路会議,779,1993.
- [66]Part7 再生舗装 No.11~13,舗装,pp.21-25,2000.12
- [67]再生アスファルト舗装の供用性,舗装,pp.8-9,1990.12
- [68](社)日本アスファルト合材協会:アスファルトコンクリート再生骨材及び再生加熱アスファルト混合物における製造並びに品質に関するアンケートによる実態調査結果,1993.3
- [69](社)日本アスファルト合材協会:舗装発生材および再生合材に関する実態調査報告書,2000.7
- [70]新田弘之,佐々木巖,西崎到,川上篤史,久保和幸:アスファルト・コンクリート塊の持続的なりサイクル,土木技術資料,pp.14-17,53-4,2011
- [71]高橋修:規格外再生骨材を使用した再生アスファルト混合物の配合に関する一考察,舗装,pp.3-8,2019.5

- [72]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,No.3,pp.71-77,2018
- [73]向後憲一:載荷条件の違いに着目したアスファルト混合物の疲労挙動に関する研究,博士論文,中央大学,2009.
- [74]久保和幸,佐々木巖,加納孝志,川上篤史:劣化アスファルト舗装の再生利用に関する研究(1),循環型社会形成のためのリサイクル建設技術の開発,プロジェクト研究・重点研究,研究成果報告書,2009年
- [75]西崎致,佐々木巖:劣化アスファルト舗装の再生利用に関する研究(2),循環型社会形成のためのリサイクル建設技術の開発,プロジェクト研究・重点研究,研究成果報告書,2009年,土木研究所ホームページ
- [76]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,土木学会論文集 E1(舗装工学),Vol.71,No.3,pp.73-78,2015
- [77]加納孝志,新田弘之,佐々木巖,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,pp.65-71,2015
- [78]加納陽輔,赤津憲吾,秋葉正一,川上篤史,新田弘之:再生用添加剤の性質が繰り返し再生された再生混合物と再生アスファルトの性状に与える影響,舗装,pp.28-33,2017.3
- [79]川上篤史,田湯文将,新田弘之,五十嵐隆次,藪雅行:再生骨材配合率が高いアスファルト混合物の繰り返し再生の性状変化,第33回日本道路会議,3016,2019.11
- [80]新田弘之,田湯文将,川嶋陽子,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,pp.59-67,2019
- [81]田湯文将,新田弘之,川上篤史,川嶋陽子:アスファルト混合物の疲労抵抗性に関する評価方法の検討,第33回日本道路会議,3055,2019.11
- [82]加納孝志,小杉真平,湯川誠二郎:高温時の再生アスファルト混合物の疲労抵抗性の評価に関する検討,第33回日本道路会議,3017,2019.11

第 3 章

再生混合物の力学性状を評価する試験方法

第3章 再生混合物の力学性状を評価する試験方法

3.1 緒言

わが国では、1980年代前半にアスファルト混合物のリサイクルが始まり、図-3-1に示すとおり、アスファルト混合物の製造量に占める再生混合物の割合は1998年には50%を超え、現在では70%以上にも及んでいる[1]。アスファルト混合物は、その高い再生利用率からリサイクルの優等生と呼ばれている一方で、リサイクルを繰り返すことによって再生骨材中に含まれるアスファルトの劣化が進行し、針入度の規格を満たさない（低針入度）再生骨材が増加している[2]。このことから、アスファルト混合物の持続的な再生利用が困難になるおそれがあり、将来的な再生利用の方針を考え直す時期に来ている。

加えて、改質アスファルトの普及によって、改質アスファルト由来の再生骨材が増えたことも再生骨材の針入度の低下を助長していると考えられている[2]。再生骨材の針入度の規格値は、旧アスファルトの針入度が20を下回ると実道のひび割れ率が著しく増加する傾向が確認されている[3][4][5][6]ことからであるが、これはストレートアスファルトの使用を想定したものであり、改質アスファルトの使用割合が増えた場合は、再生骨材の規格値を修正する必要性が考えられる。

一方、舗装発生材のアスファルト種を判別するには、長い時間と費用を要す。また、プラントには、改質成分を含む舗装発生材とストレートアスファルトを含む舗装発生材が混在した状態で搬入されるため、再生骨材をアスファルトの種類で分別することは困難である。したがって、改質由来の再生骨材が混在した状況でも品質を確保できる製造技術を見出すことが、実用面の観点では重要となる。

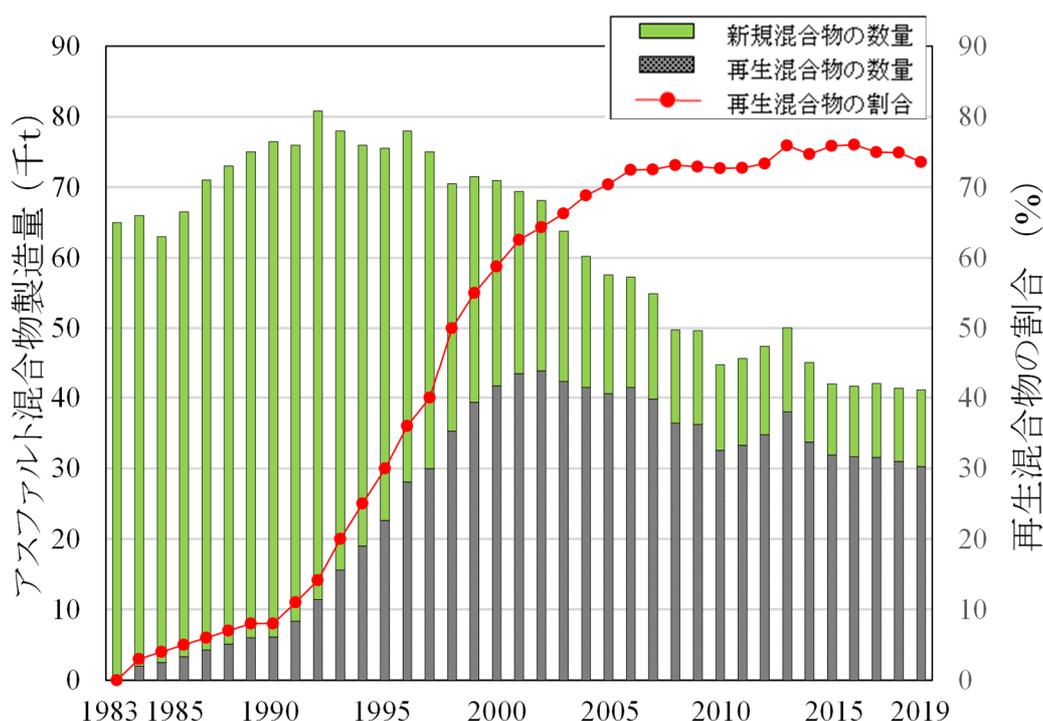


図-3-1 再生混合物の製造割合の推移

このため、本研究では、再生骨材の針入度が規格値を外れたものであっても、あるいは再生骨材中のアスファルトが異なる種類であっても、これを使用した際のアスファルト混合物自体が、一定の品質規格を確保する設計方法と製造技術が必要になると考え、本章では混合物の品質を評価する方法を検証した。

3.2 既往の評価試験方法

再生混合物の力学性状に関する既往の研究については、第2章で示したが、再生骨材の劣化程度や配合率の影響を適切に評価できる試験方法は少なく、特に疲労抵抗性に関して明確に評価できる試験方法はない。そこで、本研究では適切に評価できる試験方法を見出すことから始めることとした。

アスファルト混合物の疲労特性に関しては、車両通過時にアスファルト舗装の下面に生じる引張りひずみによって発生するものとされている。このため、既往の研究では主に引張りひずみまたは引張り応力を変えて、破壊に至るまでの載荷回数関係を室内疲労試験によって求める方法が行われてきた。

アスファルト舗装の疲労破壊に関して、初めて指摘したのは、Hveemらである[7]とされ、以降、米国では様々な疲労試験が開発されてきたが、一般的な疲労試験としては、DeaconとMonismithによって開発された4点曲げ疲労試験である[8][9]。

一方、ヨーロッパでは、2点曲げ疲労試験「Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens : BS EN12697-249」が一般的に行われている[10][11]。4点曲げ疲労試験は、載荷治具が供試体を拘束するため、高温では拘束力による破損が懸念されるのに対して、2点曲げ疲労試験は、台形供試体を用い拘束部の影響を受けにくい構造となっているため、比較的高い温度域で試験が可能となる。

間接引張試験による疲労試験は、Collop[12][13]やRoqueら[14]によって研究され、実路から採取したコアが適用できることや、供試体の作製が容易なこと、また、比較的短時間で試験が行えることから、簡易な疲労試験として適用されてきた。しかし、載荷方法が応力制御に限定されることや、他の疲労試験方法を比較すると少ない載荷回数で破壊するため、試験の再現性が課題されている[15]。

Push-pull一軸疲労試験は、SHRPにおいてLyttonら[16]によって研究されており、ひずみ量を微量で制御でき、供試体に一樣のひずみを与えることができる点が特徴である[17][18][19][20]。しかしながら、載荷回数の増加に伴いスティフネスの変曲点が明確に表れないことから、破壊点を判定することが難しいことが課題である。

疲労試験以外の方法としては、米国のイリノイ州では、2013年から「Semi-circular bending beam test : AASHTO TP 124-18[21]」（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た事例[22]がある。ここでは、試験から求められる柔軟性指数（Flexibility Index : 以下FI）と実路供用性の関連性を見出している。この試験方法に関しては、後述で詳細に示す。

わが国の再生混合物の評価は、圧裂試験を用いており、再生混合物の設計図書である舗装再生便覧[23]には設計値として圧裂係数が記されている。

しかし、圧裂係数はアスファルト混合物のスティフネスを表す指標であり、ひび割れ抵抗性などの評価は難しい。また、再生混合物は再生骨材や再生用添加剤を配合するた

め、温度による影響は新規アスファルト混合物と異なると考えられるが、試験温度に応じた圧裂係数の基準は示されていない。

また、疲労抵抗性に関する評価試験としては、舗装調査・試験法便覧 B-0018T にも掲載されており、わが国でもっとも標準的なアスファルト混合物の疲労試験となっている。試験は、一般的に $-10\sim 20^{\circ}\text{C}$ で行われ、ストレートアスファルトを用いたアスファルト混合物の場合は、 10°C 付近で散逸エネルギーがピーク[24]となり、最も供試体に対して負荷がかかることから、 10°C において試験を行う事例が多い。しかし、既往の研究では、新規混合物と比べて再生混合物は破壊回数が増加する傾向が確認されている[25][26][27]。この結果は実路の供用状態[28][29][30][31]と合致しない傾向であることから、曲げ疲労試験による再生混合物の評価は困難と考えられる。

また、供試体を拘束する治具は自動で拘束力を制御することから、 30°C 以上の高温では、治具の拘束によって供試体が破壊する現象が生じるため、 30°C 以上の温度では適切な試験が出来ないと考えられている。

近年なって、再生混合物の疲労試験を高温域(40°C)で行った研究[32][33]が報告されている。ここでは再生混合物を高温域の疲労抵抗性を評価することで、実路の供用状況と同様の傾向を導き出している。しかし、判定方法が目視によるひび割れ量の測定であるため、時間と手間を要すことや個人差を生じることが課題となっている。

ここで、異なる温度でアスファルト混合物の疲労特性を比較すると、疲労試験をひずみ制御で行うか、応力制御で行うかによって逆の結果が得られる[34]。

これは、アスファルト混合物の疲労特性が、ひずみと応力だけで評価することができず、アスファルト混合物の温度に伴うスティフネスを併せて考慮しなければならないことを示している[35][36]。

再生混合物と新規混合物の大きな違いは、再生骨材と再生用添加剤を使用することであり、これらを配合した際に混合物に与える影響を評価する必要がある。

わが国における設計方法は、再生用添加剤の添加量を決定する針入度は 25°C で行い、混合物の強度特性は 60°C で実施するマーシャル安定度、 20°C の設計圧裂係数に関して規定されている。しかし、それぞれの関係性が明確に示されておらず、疲労抵抗性の評価に関しても行っていない。

再生混合物は再生用添加剤を用いて 25°C の針入度を調整しても、改質由来の再生骨材が増加すると、これらの影響により高温域では硬質化することが懸念される。

また、再生骨材が劣化するほど、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より、感温性が低いため、添加量が増えるほど、低温域の混合物のスティフネスは低下することが考えられる。

そこで、研究の初めに、再生アスファルトの感温性に関して検証することとし、この結果をもとに再生混合物の力学特性を評価する方針とした。

なお、検証方法は、ストアス 60/80 と改質 2 型について室内において促進劣化させ、針入度が異なる 2 種のアスファルトを作製した後、これに再生用添加剤を添加して針入度を 70 に調整し、この再生アスファルトの温度を変えて針入度試験を実施した。具体的内容については、以降において詳細に説明する。

3.3 再生混合物の力学特性の評価方法

アスファルトの硬さは 25℃で調整したとしても、アスファルトの粘弾性状は温度によって大きく変化するため、実際の供用温度を考慮して評価する場合には様々な温度域でアスファルト混合物の力学性状を確認する必要がある。

既往の研究では、再生混合物の破損形態として、ひび割れ損傷が報告されていることから、再生混合物のひび割れ抵抗性や疲労抵抗性に関して、供用する温度域を考慮して評価を行う方針とした。

ひび割れの発生要因は、一般的に表-3-1 の種類に分類される[37][38]が、このうち、再生骨材の適用を勘案するとアスファルトの劣化が影響するひび割れとしては、疲労ひび割れ、わだち割れ、リフレクションクラックであり、再生混合物の場合は、アスファルトの劣化を加味しながら、これらの耐久性を考える必要がある。

表-3-1 ひび割れの種類

種類	細分類		発生要因
線状のひび割れ	縦方向	疲労ひび割れ	・車輛の繰返し载荷・アスファルトの劣化
		施工継目のひび割れ	・継目の接着不良
		わだち割れ	・車輛の繰返し载荷・アスファルトの劣化・舗装温度の上昇
	横方向	リフレクションクラック	・下層にある目地やひび割れの支持力差の影響・アスファルトの劣化
		ヘアクラック	・混合物の品質不良・締固め不足・温度過高
		温度応力ひび割れ	・アスファルトの温度収縮、アスファルトの劣化
	その他	構造物周辺のひび割れ	・不当沈下・路盤路床の締固め不足
凍上によるひび割れ		・凍上による隆起	
面状のひび割れ	亀甲状のひび割れ		<ul style="list-style-type: none"> ・路床・路盤の支持力低下(不足) ・融解期の路床・路盤の支持力低下 ・路床・路盤の沈下(不当沈下) ・基層のはく離

(1) リフレクションクラックの評価

本研究では、最初に米国のイリノイ州で行われている再生混合物の評価方法に着目した。イリノイ州ではコンクリート舗装上に再生骨材配合率を変えて再生混合物のオーバーレイを行い、リフレクションクラックの発生を検証している。クラック延長と SCB 試験から求められる柔軟性指数 (FI) の関係を見出すことで、FI を再生混合物のひび割れ抵抗性の品質管理基準としている[22]。

研究段階では、-30～38℃の範囲で試験温度と载荷速度を変えて SCB 試験を行い、破壊エネルギー (荷重と変位量の積分値) を算出したところ、混合物の配合に対して優位差が見られた試験温度が 25℃であり、また、上記に示した実路のリフレクションクラックの発生状況と相関が高かったことから試験温度は 25℃を推奨している[39]。

(2) わだち割れの評価

次にアスファルト舗装の破損形態には、車輪の走行位置付近の表面に縦方向に発生するトップダウン型のひび割れとしてわだち割れの現象がある。この現象は夏季にひび割れが発生すると考えられており、吉田らによる検証試験では、新規混合物は 30℃、劣化した混合物の場合は 40～50℃においてわだち割れの進行が大きいことが分かっている[40]。

再生混合物は再生用添加剤を用いて 25℃における目標針入度を得たとしても、一般に動的安定度が高い値が出ることから高温域では硬質化していることが懸念される。このため、40～50℃における疲労抵抗性を確認する必要がある。

高温域における再生混合物の力学性状に関する既往の研究としては、40℃において車輪走行による繰り返し载荷試験を行い、再生骨材の劣化程度とひび割れ抵抗性の関係を明らかにした報告[32]がある。しかし、この方法では走行回数 500 回毎にひび割れ率を計測する必要があり、時間と手間を要する。また、ひび割れ抵抗性や疲労抵抗性の評価方法としては、試験法便覧 B018T 曲げ疲労試験が用いられるが、試験機の構造上、高温では試験を行うことができない。

そこで、フランスでの使用事例が多い試験方法で、高温域(40℃)でも適切な疲労抵抗性の評価が可能な試験として、2点繰り返し曲げ試験「Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens : BS EN12697-249」[41]をわだち割れの評価試験として適用した。

(3) 疲労ひび割れの評価

一方、アスファルト舗装のひび割れとしては疲労ひび割れがあり、舗装下面に生じる引張ひずみが繰り返し作用することで発生するひび割れであり、いわゆるボトムアップ型のひび割れがある。

検証方法は曲げ疲労試験が広く用いられており、試験温度は、ストアスを用いた混合物の場合は、10℃付近で散逸エネルギーは最も高くなり、疲労破損の観点で最も厳し条件であることから[24]、10℃で試験を実施する事例が多い。

再生骨材の針入度が低いものは、一定の針入度に回復するため必要な再生用添加剤の添加量は多くなる。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、再生骨材の針入度が低い再生混合物は粘性の低い再生用添加剤量が増えるため、低温域のスティフネスが低下すること考えられる。一般に耐久性はスティフネスの低下によって低下することから、低温域の耐久性を確認するため、再生混合物の疲労抵抗性を確認した。しかし、アスファルト混合物の疲労特性を曲げ疲労試験(試験法便覧 B018T)を用いて検証するとスティフネスが小さい混合物は、疲労破壊回数が増加する場合がある[42]。この理由は、ひずみ制御の疲労試験は、スティフネスが小さい混合物は応力負荷が少ないため、疲労破壊回数が増加すると推察される。したがって、スティフネスの低下が懸念する場合は、一定の応力負荷を作用させる条件下で疲労特性を検証する必要がある。応力制御が可能な繰り返し载荷試験装置としては Nottingham Asphalt Tester を使用した Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) 試験 (BS EN 12697-24) [43]がある。一方、ひび割れの検証としては、混合物に対して曲げや引張の破壊作用をもたらす試験方法が適当であり、これに該当する試験方法としては、先に述べた SCB 試験がある。そこで本研究では、Nottingham Asphalt Tester による ITSM 試験と SCB 試験を組み合わせた試験方法(以下、NAT-SCB 試験)を考案し、これによって低温域の

疲労特性を確認した。

3.4 再生アスファルトの温度と性状

再生アスファルトの感温性を確認するため、試験温度を 10℃、25℃、40℃と変えて針入度試験方法：舗装調査・試験法便覧（以下、試験法便覧）A041 を実施した。

試料は表-3-2 に示すストレートアスファルト（以下、ストアス）60/80 およびポリマー改質アスファルトⅡ型（以下、改質Ⅱ型）を薄膜加熱試験方法：試験法便覧 A046 によって促進的に劣化させ、劣化程度の異なる 2 種のアスファルトを作製したのち表-3-3 の再生用添加剤によって針入度 70 に調整した。

劣化アスファルトの針入度、および針入度を 70 にする再生用添加剤量は、表-3-4 に示すとおりである。

針入度試験を実施した温度と針入度の関係は、図-3-2、図-3-3 のとおりである。

この結果、温度ごとにアスファルトの劣化程度と硬さを比較すると、25℃で針入度を同値に合わせても、劣化が進行した（針入度が低い）アスファルトは、25℃より高温側では針入度が低くなり、低温側では高くなるのが分かる。

したがって、アスファルトの劣化の進行に伴い、25℃よりも高温では硬質化し、低温では軟質化する傾向があり、感温性が高くなることが明らかとなった。この理由は、高温側はアスファルトの劣化や改質剤の影響があり、低温側は再生用添加剤の影響があるものと推察される。

表-3-2 再生骨材作製用のアスファルト性状

項 目	ストアス 60/80	改質Ⅱ型
針入度 (25℃) (1/10mm)	70	49
軟化点 (℃)	46	62
密 度 (15℃) (g/cm ³)	1.037	1.035
タフネス (25℃) (N・m)	—	28.6
テナシティ (25℃) (N・m)	—	23.3

表-3-3 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		

表-3-4 再生アスファルトの針入度と再生用添加剤量

アスファルト種類	針入度 (1/10mm)	再生用添加剤量 (%)	試験温度(°C)			
			10	25	30	40
ストアス 60/80	バージン	0.0	10	70	115	382
	Pen=17	17.5	18	68	102	285
	Pen=24	10.5	13	69	109	330
改質Ⅱ型	バージン	0.0	12	54	100	250
	Pen=21	9.8	22	69	104	270
	Pen=33	8.4	18	71	110	300

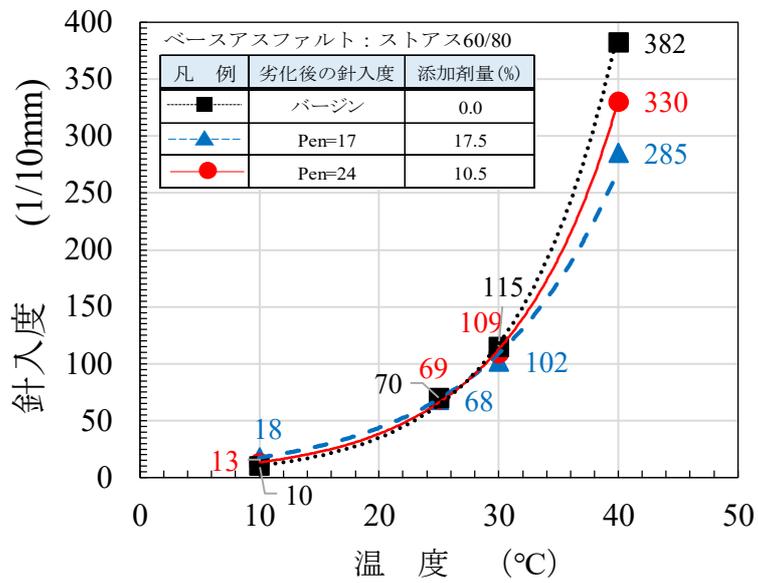


図-3-2 試験温度と針入度の関係 (ストアス 60/80)

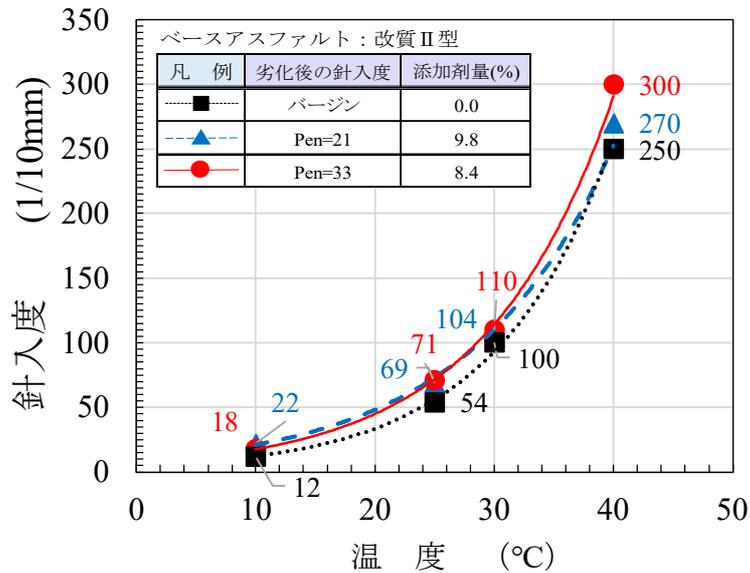


図-3-3 試験温度と針入度の関係（改質Ⅱ型）

3.5 再生混合物の作製

アスファルトの劣化は、加熱や酸化、あるいは紫外線の照射により、高分子化することによってアスファルトの組成が変化し、これに伴いアスファルトの物性は、粘性が増加し硬質化する。しかし、その程度は、アスファルトの種類や劣化要因の作用によって大きく異なることから、既設舗装から劣化状態が同一の試料を繰り返し採取することは極めて難しい。

このため、本研究では、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[44]を参考に、表-3-5に示す密粒度(13)混合 7.5kgを金属バット(36cm×24cm)に敷き均し、110℃の乾燥炉で加熱することにより促進的に劣化させることで、均一な劣化状態の再生骨材を作製した。

また、近年では改質由来の再生骨材が多いことから、再生骨材のベースアスファルトは、表-3-2に示すポリマー改質Ⅱ型アスファルト（以下、改質Ⅱ型）とストレートアスファルト60/80(以下、ストアス)の2種を検討に用いた。これらのアスファルトを用いた新規混合物の性状は表-3-6に示すとおりである。

本研究では、再生骨材の劣化程度の違いが再生混合物の力学性状の及ぼす影響を評価するため、加熱養生時間を変えることで劣化程度が異なる再生骨材を作製した。劣化程度は、舗装再生便覧に針入度規格が指定されているため、この規格を満足するもの、規格値同等、規格値以下の3種を比較することとし、針入度が25～30程度、20前後、10～15程度を選定した。

乾燥炉における加熱養生時間とアスファルト回収試験後の針入度の関係は、図-3-4に示すとおりである。

次に旧アスファルトの針入度調整は表-3-3に示す再生用添加剤を用いて目標針入度70に調整した。

各再生骨材の針入度とこれを針入度70に回復させる再生用添加剤の添加量は、表-3-7に示すとおりである。

検討に用いた再生混合物の配合割合は、表-3-8、表-3-9に示すとおりであり、前述に示した6種の再生骨材（ベースアスファルト2種、針入度3種）を使用し、それぞれ再生骨材配合率を30%、50%、70%と変化させた。各混合物は、それぞれ配合設計を実施し、最適アスファルト量を決定した。各再生混合物のマーシャル特性値は、表-3-10に示すとおりである。

表-3-5 再生骨材作製用の新規混合物の配合

種類	配合率 (%)	合成粒度	
		ふるい目	通過質量百分率 (%)
6号砕石	37.5	13.2mm	100.0
7号砕石	20.0	4.75	62.5
粗 砂	36.4	2.36	42.5
石 粉	6.1	0.6	21.9
		0.3	14.1
		0.075	6.0

表-3-6 再生骨材作製の新規混合物の性状

項目	ストアス 60/80	改質Ⅱ型
最適アスファルト量 (%)	5.7	5.7
密度 (g/cm ³)	2.355	2.354
空隙率 (%)	3.9	3.9
マーシャル安定度 (kN)	10.13	14.55

表-3-7 試験項目および試験方法

アスファルト種類	目標針入度 (1/10mm)	促進劣化 時間 (時間)	回収アス 針入度 (1/10mm)	再生用 添加剤量※ (%)
ストアス 60/80	25～30程度	48	29	8.7
	20前後	96	20	11.7
	10～15程度	288	13	20.3
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

※ 再生用添加剤量は目標針入度:70の添加量

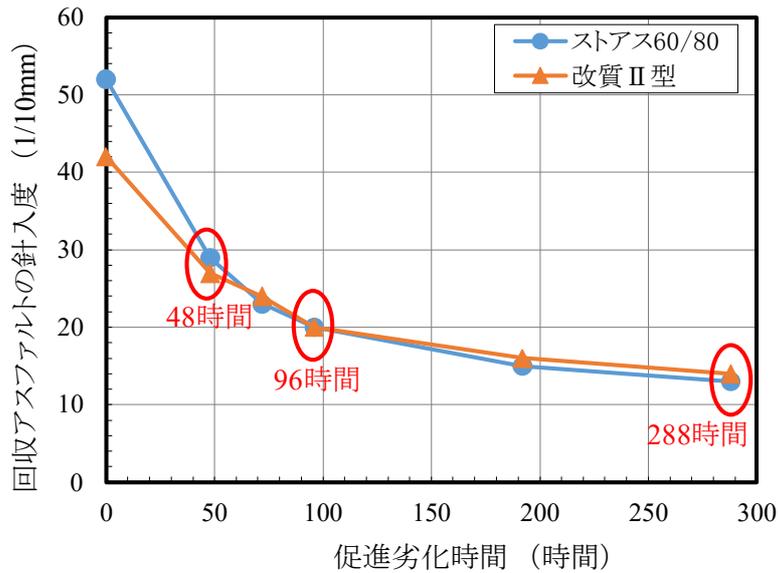


図-3-4 劣化時間と回収アスの針入度

表-3-8 再生混合物の配合 (ストアスの再生骨材)

再生骨材のアス種		ストアス60/80								
		Pen=13			Pen=20			Pen=29		
種類		30%	50%	70%	30%	50%	70%	30%	50%	70%
再生骨材配合率		30%	50%	70%	30%	50%	70%	30%	50%	70%
配 合	再生骨材	30.0	50.0	70.0	30.0	50.0	70.0	30.0	50.0	70.0
	6号碎石	26.5	19.5	12.0	27.0	20.0	13.0	27.5	21.0	14.0
	7号碎石	14.5	10.5	7.0	14.5	11.0	7.0	13.5	9.0	5.0
	粗砂	26.0	18.5	11.0	25.0	17.5	10.0	25.5	18.0	11.0
	石粉	3.0	1.5	—	3.5	1.5	—	3.5	2.0	—
	最適アス量	6.00	5.90	5.80	5.90	5.80	5.70	5.80	5.70	5.60
(%)	新アス(60/80)	3.97	2.51	1.05	3.99	2.62	1.24	3.94	2.60	1.25
	旧アス	1.69	2.82	3.95	1.71	2.85	3.99	1.71	2.85	4.00
	再生用添加剤	0.34	0.57	0.80	0.20	0.33	0.47	0.15	0.25	0.35

表-3-9 再生混合物の配合 (改質II型の再生骨材)

再生骨材のアス種		改質Ⅱ型								
種 類		Pen=14			Pen=20			Pen=27		
再生骨材配合率		30%	50%	70%	30%	50%	70%	30%	50%	70%
配 合	再生骨材	30.0	50.0	70.0	30.0	50.0	70.0	30.0	50.0	70.0
	6号碎石	26.5	19.5	12.0	27.5	21.0	14.5	28.0	21.5	15.0
	7号碎石	14.5	10.0	6.5	15.0	11.0	7.5	13.0	8.5	4.0
	粗砂	26.0	19.0	11.5	24.0	16.5	8.0	26.0	18.5	10.5
	石粉	3.0	1.5	—	3.5	1.5	—	3.0	1.5	—
	最適アス量	6.00	5.90	5.80	5.90	5.80	5.70	5.80	5.70	5.60
(%)	新アス(60/80)	4.00	2.56	1.12	3.98	2.60	1.21	3.96	2.63	1.28
	旧アス	1.62	2.71	3.80	1.70	2.84	3.98	1.67	2.78	3.90
	再生用添加剤	0.38	0.63	0.88	0.22	0.36	0.51	0.17	0.29	0.42

表-3-10 再生混合物のマーシャル特性値

アス種	再生骨材		OAC (%)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	安定度 (kN)
	針入度 (1/10mm)	配合率 (%)				
ストアス 60/80	29	30	5.8	2.348	4.0	9.57
		50	5.7	2.351	4.0	10.06
		70	5.6	2.354	4.0	10.38
	20	30	5.9	2.350	3.9	10.06
		50	5.8	2.352	4.0	10.54
		70	5.7	2.355	4.0	11.60
	13	30	6.0	2.342	4.0	10.63
		50	5.9	2.344	4.0	11.35
		70	5.8	2.348	4.0	12.51
改質 II型	27	30	5.8	2.348	4.0	11.74
		50	5.7	2.353	3.9	12.29
		70	5.6	2.356	3.9	12.58
	20	30	5.9	2.354	3.8	12.13
		50	5.8	2.358	3.8	12.99
		70	5.7	2.361	3.9	13.89
	14	30	6.0	2.347	3.7	12.71
		50	5.9	2.349	3.8	13.79
		70	5.8	2.352	3.7	15.30

3.6 試験結果

3.6.1 従来の評価方法(圧裂試験)

舗装再生便覧では、再生混合物の設計圧裂係数を一般用であれば 0.6~0.9(MPa/mm : 20°C)と示している[45]. 再生混合物の新しい評価手法の検討に先立ち、従来の評価手法である圧裂係数を用いて評価を試みた. ここで、わが国の再生混合物の設計は、旧アスファルトに再生用添加剤あるいは高針入度アスファルトを添加することで回復させ、評価方法は針入度試験を用い、25°Cにおけるアスファルトの硬さを調整する方法を行っている. 一方、舗装再生便覧で記される設計圧裂係数は、20°Cの試験値であり、試験温度の条件に若干の相違がある. このため、本研究では、試験法に準じた温度である20°Cと、アスファルトの針入度試験と同じ25°Cで圧裂試験を実施した.

再生骨材配合率と圧裂係数の関係は、試験温度 20°Cを図-3-5、図-3-6 に、試験温度 25°Cを図-3-7、図-3-8 に示すとおりである.

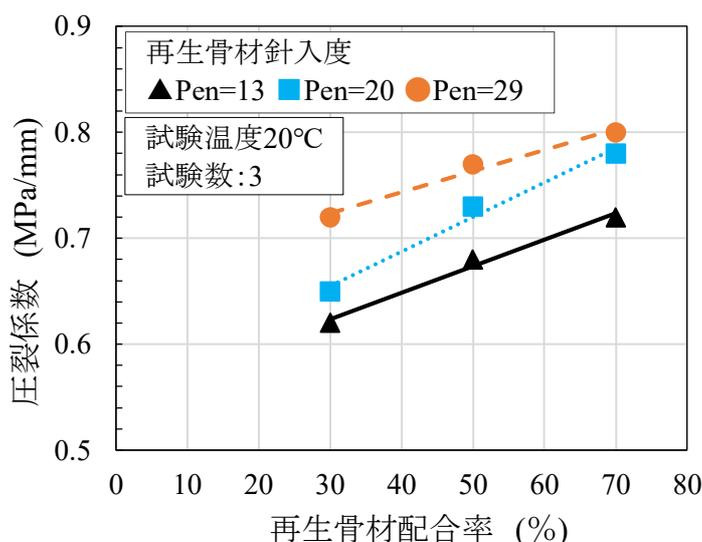


図-3-5 ストアス再生骨材を使用した再生混合物の圧裂係数

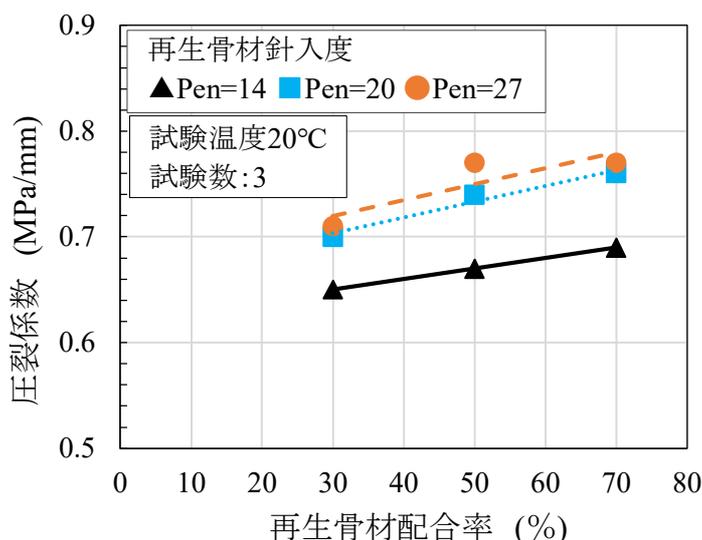


図-3-6 改質 A s 再生骨材を使用した再生混合物の圧裂係数

図-3-5、図-3-6 より 20°Cの圧裂試験結果は、全ての配合について設計圧裂係数を満足している. ストアス再生骨材を使用した場合は、再生骨材配合率の増加とともに圧裂係数が増加する傾向がみられているが、針入度が高い再生骨材は圧裂係数が高い.

また、改質 II 型再生骨材の場合は、再生骨材の針入度も配合率も圧裂係数とは明確な差異は見られなかった。この様に圧裂係数では、再生骨材の針入度や配合率の影響を明確に判定できない結果となった。また、図-3-7、図-3-8 より 25℃の結果は、試験温度が高いため全般に圧裂係数が低下しているが、再生骨材の配合率や劣化程度との関係は、20℃と同傾向であり、圧裂試験では明確な傾向が得られない結果となった。

この理由としては、舗装再生便覧にも示されているとおり、圧裂係数は針入度と関連性が深く、針入度を調整することで、混合物の硬さが調整されて同程度の圧裂係数となるため、再生骨材の劣化程度や配合率の影響が明確に表れなかったものと推察される。

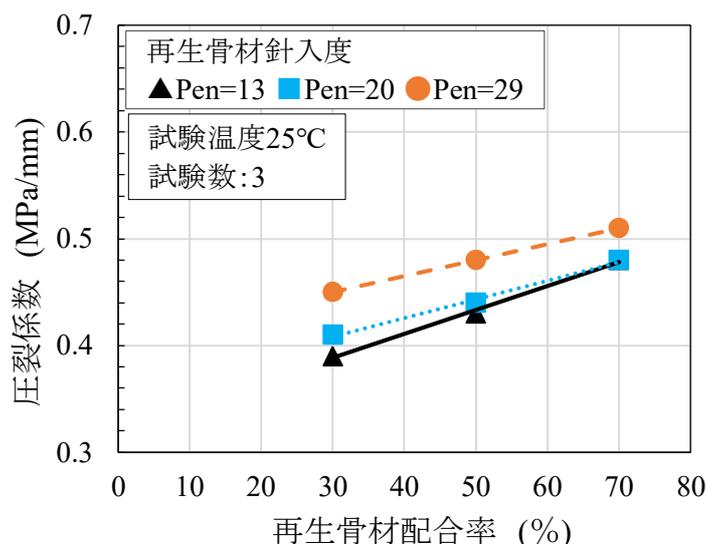


図-3-7 ストラス再生骨材を使用した再生混合物の圧裂係数

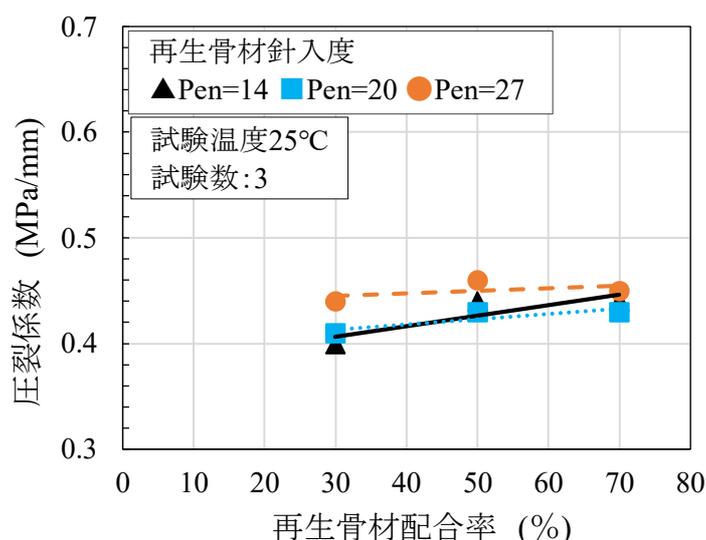


図-3-8 改質 A s 再生骨材を使用した再生混合物の圧裂係数

3.6.2 常温域における評価方法

再生混合物の評価は、再生骨材の劣化に伴う脆化の影響を把握するため、ひび割れ抵抗性や疲労抵抗性の評価が重要となる。舗装再生便覧には、設計圧裂係数の範囲を設定しているが、荷重を変位量で除して算出する圧裂係数は、混合物の弾性係数に相当するものであり、混合物のひび割れ抵抗性を適切に評価することは難しい。

米国のイリノイ州では、「Semi-circular bending beam test : AASHTO TP 124-18[21]」（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た事例[22]がある。

ここでは2013年からコンクリート舗装上に再生骨材配合率を変えて再生混合物のオーバーレイを行い、リフレクションクラックの発生を検証している。その結果は図-3-9に示すとおりであり、目地上の横方向のクラック延長とSCB試験から求められる柔軟性指数（FI）の関係を見出すことでFIを再生混合物のひび割れ抵抗性の品質管理基準としている[22]。さらに、イリノイ州では、SCB試験と「Hamburg Wheel Tracking Test : AASHTO T324」から、図-3-10に示すとおり混合物性状の範囲を、FIが8以上、わだち掘れ量が12.5mm以下を適正と判定している。

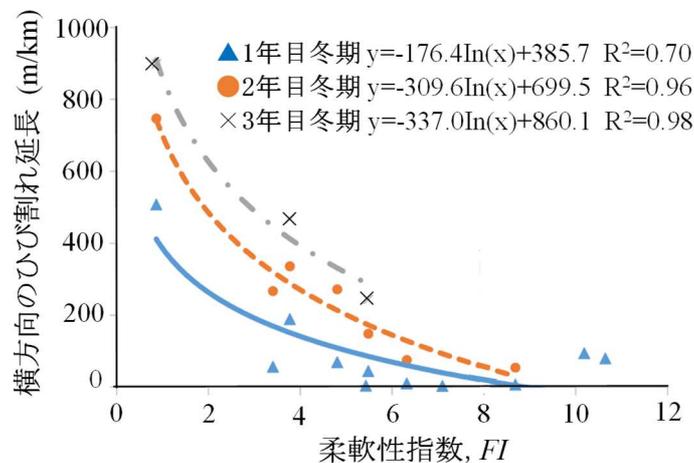


図-3-9 イリノイ州のFIと実路ひび割れの関係

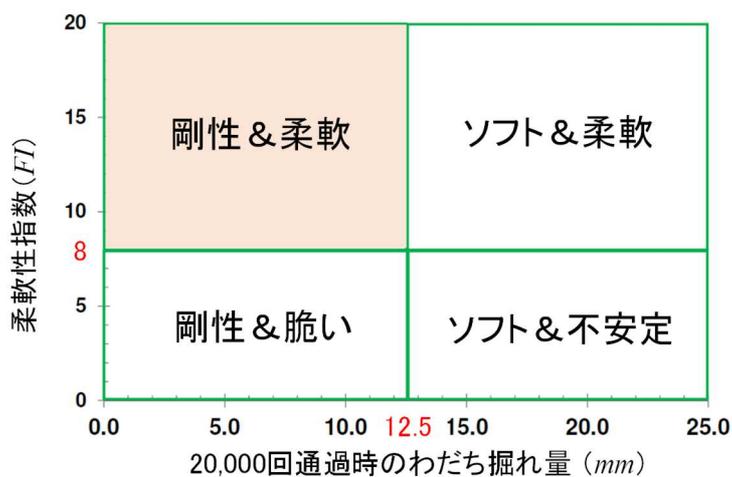


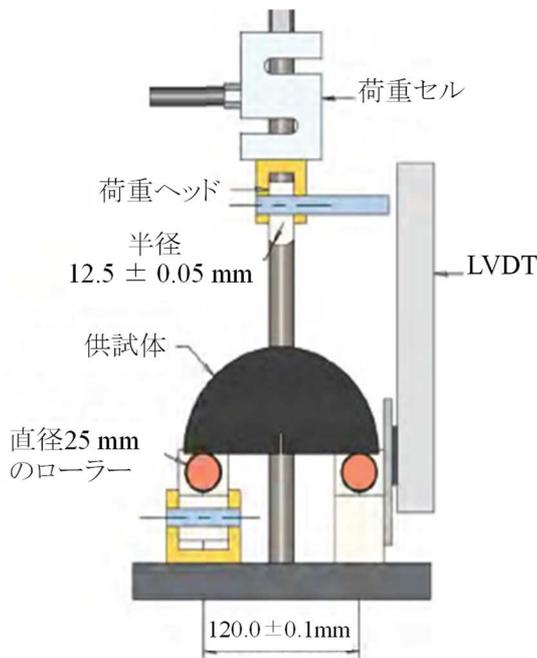
図-3-10 イリノイ州の再生混合物の基準値

SCB試験の荷装置置および試験条件は図-3-11に示すとおりであり、曲げ破断と引張破断を複合した破壊作用を評価している。

SCB 試験の供試体は、直径 150mm 厚さ 50mm の半円柱体であり、円中心部にノッチ（幅 $1.5 \pm 0.5 \text{mm}$ 、長さ $15 \pm 1.0 \text{mm}$ ）と呼ばれる切り込みが入っている(図-3-12).

供試体の作製方法は、ジャイレトリーコンパクタを用いて直径 150mm 厚さ 160mm のアスファルト混合物を作製した後、中央部から半円形の供試体（直径 150mm 厚さ 50mm）を切り出し、ノッチを入れる。なお、ジャイレトリーコンパクタの締固め温度はマーシャル供試体作製時と同じ温度とし、回転数はマーシャル供試体密度と等しくなる回数とした。

なお、SCB 試験は、試験条件を変える事で様々な目的で適用されており、日本でも研究に使用されている[46].



項目	設定値
試験温度 (°C)	25
載荷速度 (mm/min)	50
支間長 (mm)	120
供試体直径 (mm)	150
供試体厚さ (mm)	50
ノッチ深さ (mm)	15
ノッチ幅 (mm)	1.5
リガメント長さ (mm)	60
リガメント面積 (mm ²)	3000

図-3-11 SCB 試験の荷重装置と試験条件

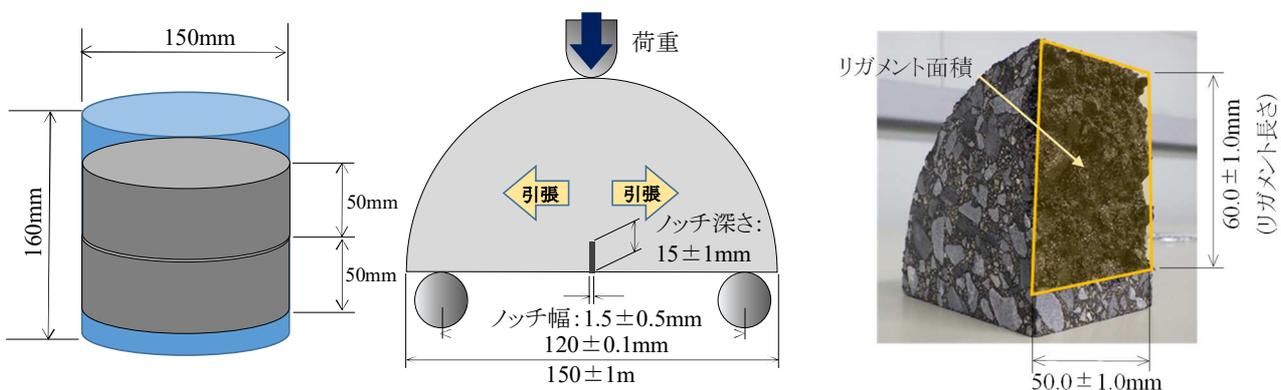


図-3-12 SCB 試験供試体とリガメント

写真-3-1 リガメント面積

柔軟性指数 FI の算出方法は、SCB 試験から得られる変位-荷重曲線（図-3-13）から、式（1）を用いて求める。

$$FI = \frac{G_f}{m} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{W_0}{A_{lig}} \quad (2)$$

ここに、

G_f : 破壊エネルギー

A_{lig} : リガメント面積

W_0 : 破壊仕事量

m : ピーク荷重後の傾き, とする.

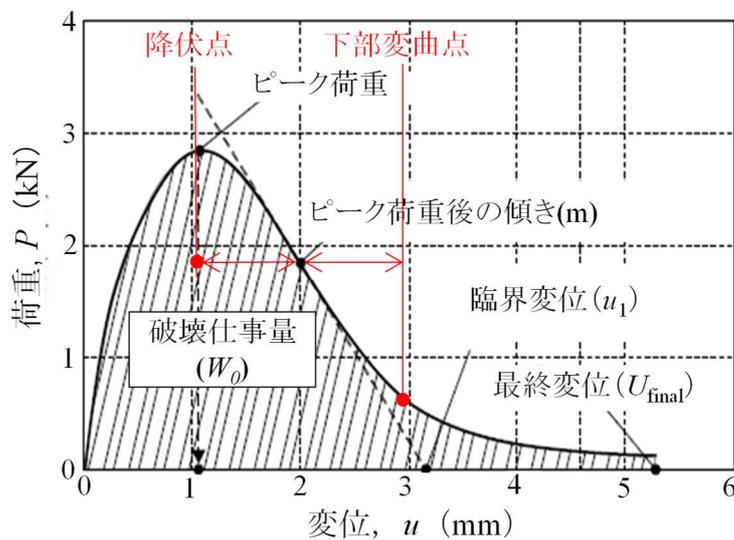


図-3-13 SCB 試験の変位－荷重曲線

W_0 は、図-3-13 において破断までの荷重－変位曲線下（ハッチ部）の面積、 m は同図において降伏点と下部変曲点の変位中央値における接線の傾き、 A_{lig} は写真-3-1 に示すような供試体の破断面の面積（ 30cm^2 ）である。

再生骨材の劣化程度と配合率を変化させた表-3-10 の再生混合物について SCB 試験を行った。ストアス再生骨材を用いた再生混合物と再生骨材を用いないアスファルト混合物（以下、新規混合物）の荷重－変位曲線を図-3-14 に示す。新規混合物は再生

混合物よりもピーク荷重とピーク荷重後の傾き m が大きく、その傾向はストアスよりも改質II型が大きい。一方、再生混合物では、再生骨材の配合率が増加するほど、荷重-変位曲線下の面積 W_0 (破壊仕事量) が小さくなる傾向がある。

この様に使用するアスファルトの種類や再生骨材の配合率によって、面積 W_0 (破壊仕事量) が変わることから、本研究では、破壊エネルギー G_f でも評価できるものと考えた。

なお、本試験は、ジャイレトリーによって締め固めた円柱供試体から4つの試験用供試体が採取できるため、試験個数を4つとしている。しかし、試験法(AASHTO TP 124-18)にも記載されているが、ノッチ部に粗骨材がある供試体は使用せず、改めて供試体を作製し試験を行っている。

また、試験は、試験温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ に保つことができる恒温槽内で実施し、同恒温槽内で供試体を2時間 ± 10 分間、 25°C で養生した後に試験を行った。

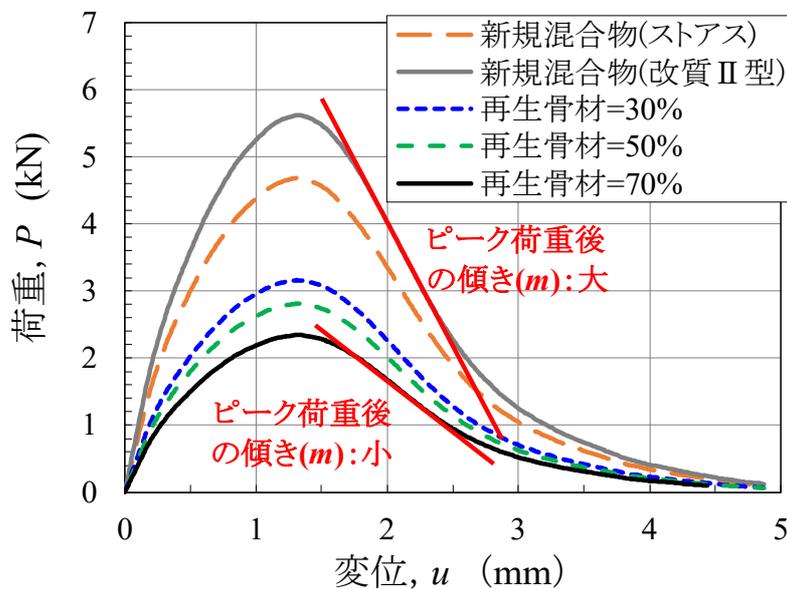


図-3-14 混合物の種類による変位-荷重曲線の違い

ストアス再生骨材および改質II型再生骨材を用いた再生混合物の再生骨材配合率と FI の関係を図-3-15 および図-3-16 に示す。いずれの場合も、再生骨材の針入度が低いものは FI が小さく、再生骨材配合率が増加すると FI が低下する。また、再生骨材

配合率と破壊エネルギー G_f の関係は図-3-17 および図-3-18 のようになり、 FI と同様の傾向が認められた。

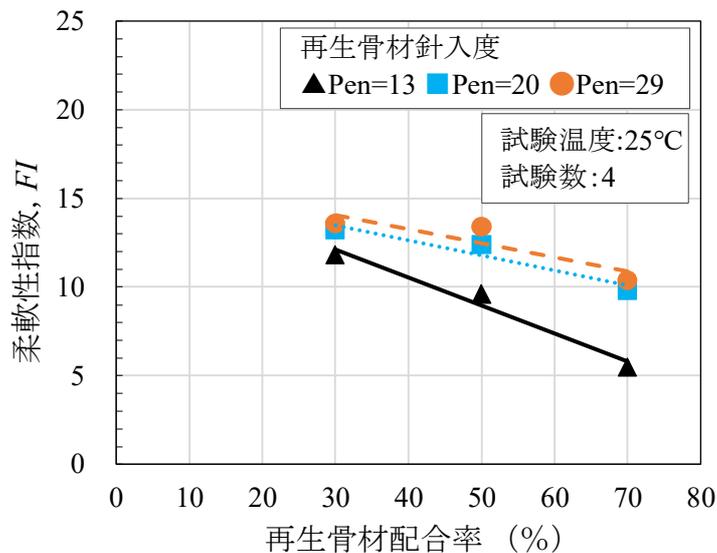


図-3-15 再生骨材配合率と FI の関係 (ストアス再生骨材)

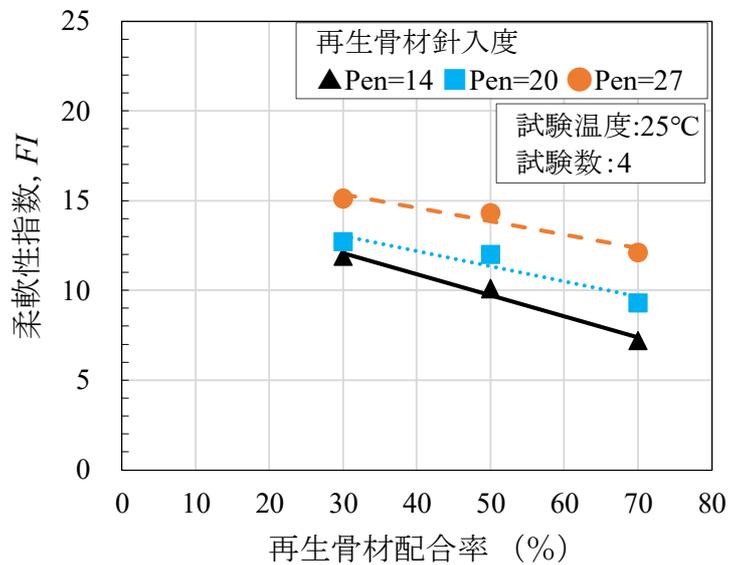


図-3-16 再生骨材配合率と FI の関係 (改質II型再生骨材)

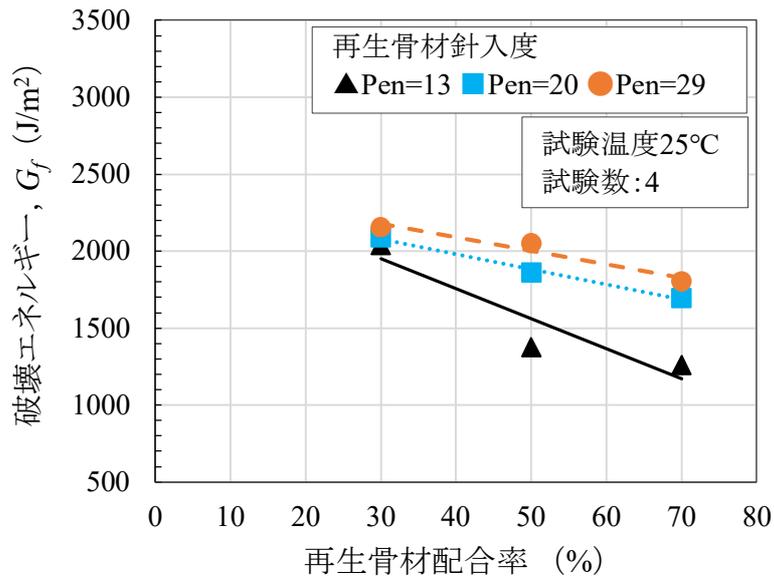


図-3-17 再生骨材配合率と G_f の関係 (ストアス再生骨材)

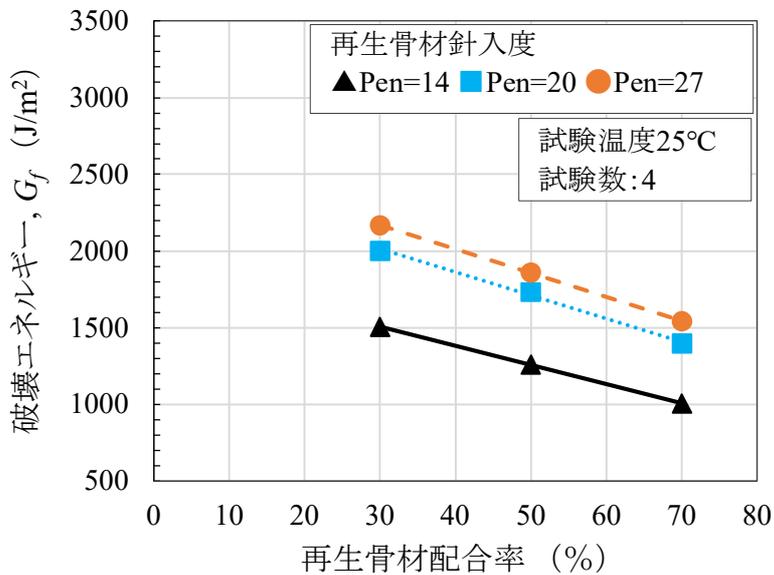


図-3-18 再生骨材配合率と G_f の関係 (改質 II 型再生骨材)

試験温度の影響を検討するために、10°Cと40°CにおいてもSCB試験を実施した。ストアス再生骨材および改質II型再生骨材を用いた場合のFIを図-3-19と図-3-20に

示す. 25℃に見られた様な針入度が低いものほど, 再生骨材配合率が大きくなるほど FI が低下する傾向は見られなかった.

一方, ストアス再生骨材および改質 II 型再生骨材を用いた場合の G_f に関しては, 図-3-21 と 図-3-22 に示すとおりであり, 試験温度の低下に伴い G_f が増加する.

しかし, FI の傾向と同様であり, 針入度が低いものほど, 再生骨材配合率が大きくなるほど G_f が低下する傾向は 25℃だけが明確に見られ, 10℃と 40℃においては明確な関係が得られなかった. 同様の結果は, イリノイ州の研究[37]においても確認されており, 試験温度が 25℃以外の温度では, 混合物の特性よりも試験温度や載荷速度の影響が強くなるため明確な傾向が得られにくく, このことから試験温度は 25℃を推奨している. 本研究においても 10℃と 40℃では, 25℃に見られたような, 再生骨材配合率の増加および針入度の低下に伴うひび割れ抵抗性の低下 (FI と G_f の減少) という妥当な結果が得られなかったことから, SCB 試験は 25℃で行うことが望ましいと考えられる.

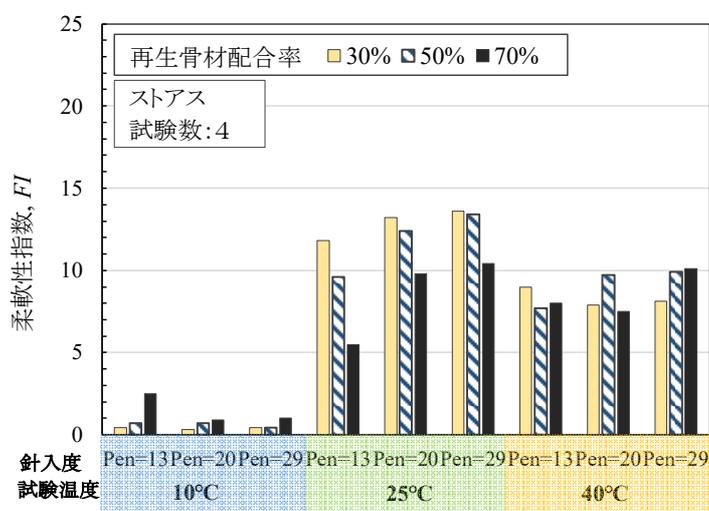


図-3-19 再生骨材配合率と FI の関係 (ストアス型再生骨材)

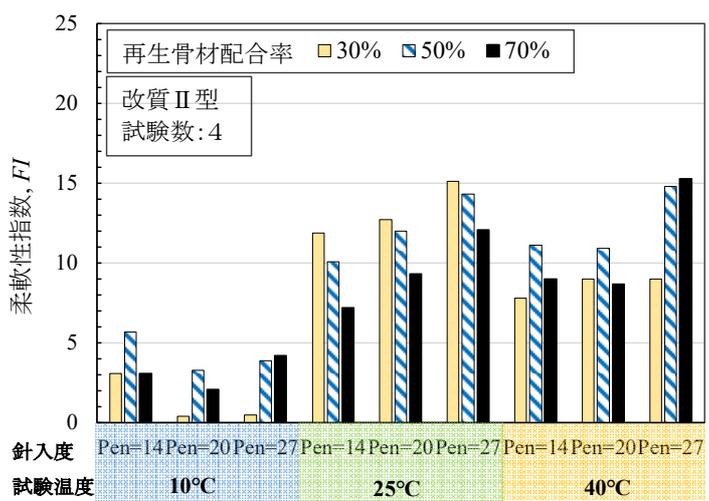


図-3-20 再生骨材配合率と FI の関係 (改質 II 型再生骨材)

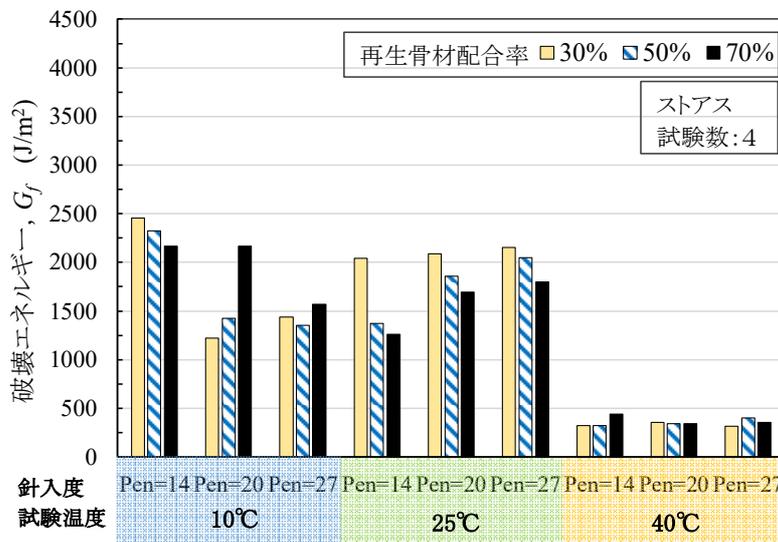


図-3-21 再生骨材配合率と G_f の関係 (ストアス型再生骨材)

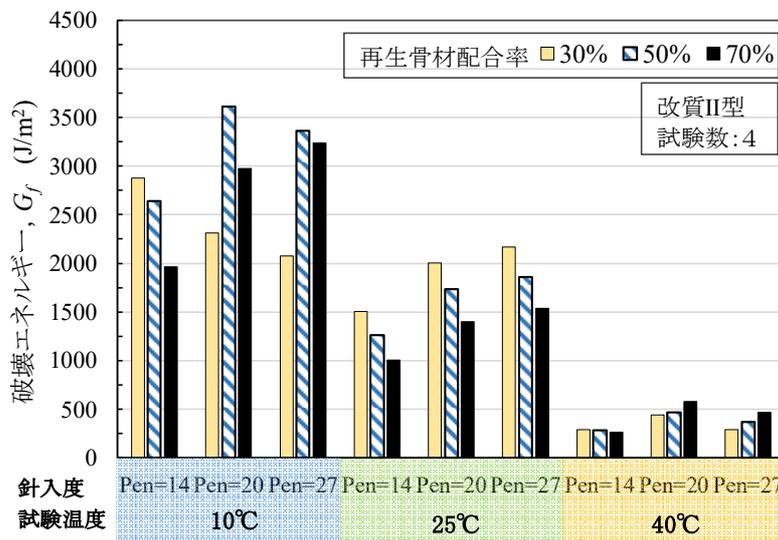


図-3-22 再生骨材配合率と G_f の関係 (改質 II 型再生骨材)

25°Cにおける SCB 試験から得られた FI と G_f の関係を図-3-23 に示す。両者には強い相関が見られることから、 G_f を用いても再生混合物のひび割れ抵抗性を評価できる

と言える。イリノイ州における研究では FI を用いているが、SCB 試験から得られるピーク後の傾き m は誤差が大きく、その結果、 FI のバラツキが大きくなることから、本研究では、破壊エネルギー G_f を再生混合物のひび割れ抵抗性評価に用いることとした。

次に SCB 試験は、ジャイレトリーコンパクタが必要であることに加え、供試体の作製に手間と細心の注意を要することから、従来から用いられている圧裂試験の荷重－変位曲線によって求めた G_f の適用性について検討した。

その結果、図-3-24、図-3-25 に示すように、SCB 試験と同様の傾向が見られたことに加え、SCB 試験から求めた G_f との間にも強い相関が見られた（図-3-26）ことから、圧裂試験から得られる G_f によっても再生混合物のひび割れ抵抗性評価が可能であると考えられる。

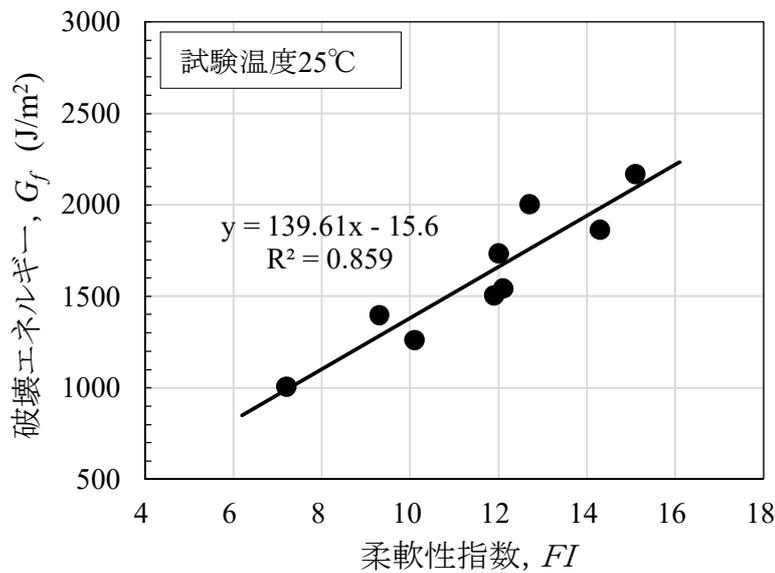


図-3-23 FI と G_f の関係

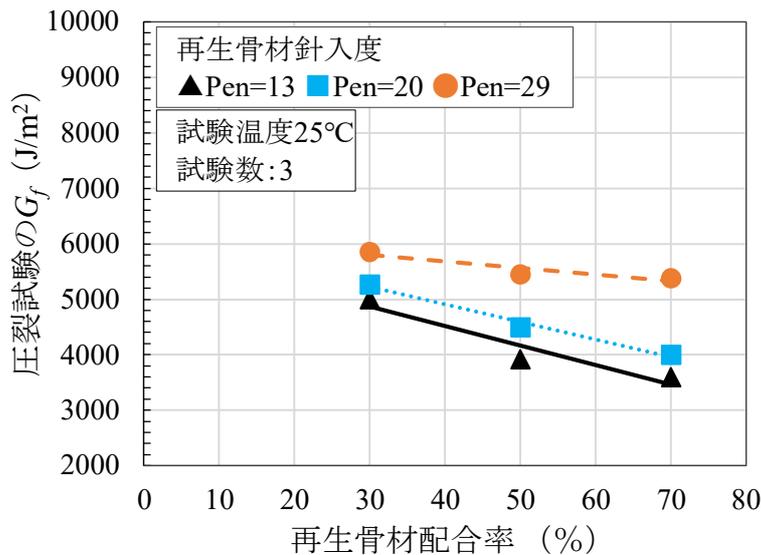


図-3-24 圧裂試験から求めた G_f (ストアス再生骨材)

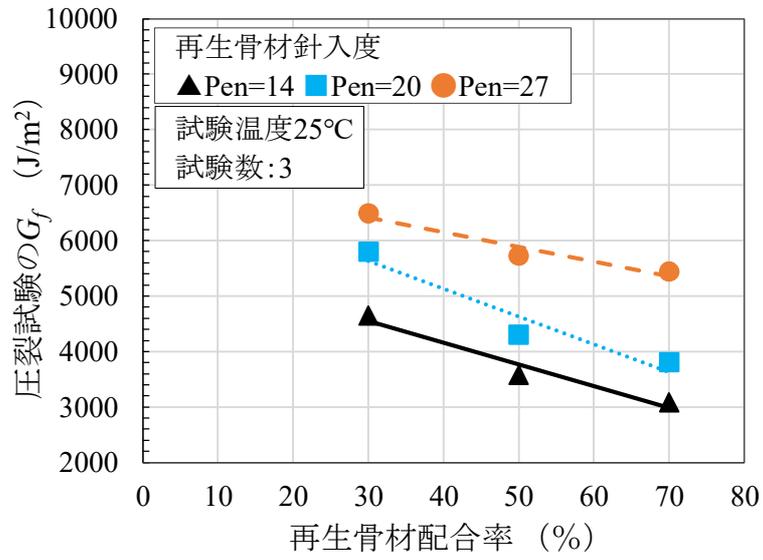


図-3-25 圧裂試験から求めた G_f (改質II型再生骨材)

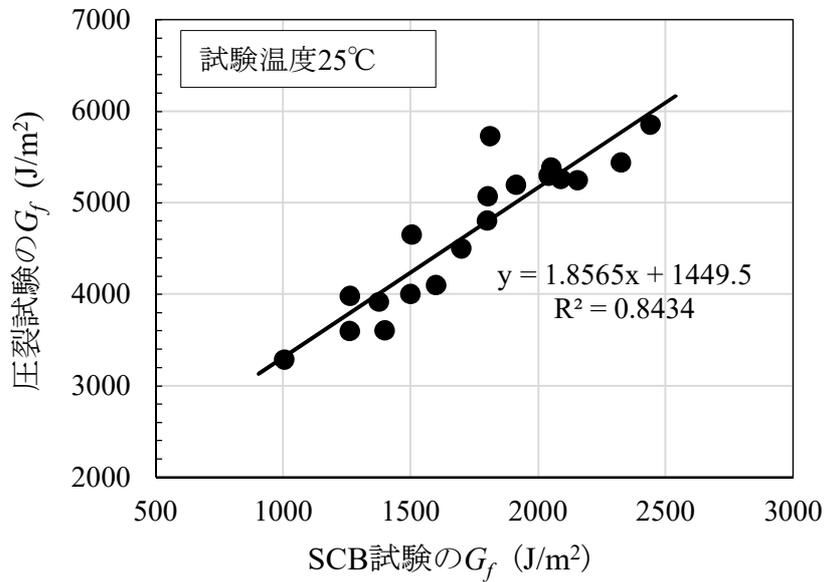


図-3-26 SCB試験の G_f と圧裂試験の G_f の関係

3.6.3 高温域における評価方法

アスファルト舗装の破損形態の1つにわだち割れがある。これは供用中の高温時に発生するもので劣化した混合物の場合は40～50℃で進行が大きいとする報告[38]がある。再生骨材に含まれるアスファルトの針入度が低下すると、**図-3-2** および **図-3-2** に示したとおり、再生用添加剤を用いて25℃における目標針入度を得たとしても、再生アスファルトは高温域で硬質化する。このため、高温域におけるひび割れ抵抗性や疲労抵抗性を確認する必要がある。高温域における再生混合物の力学性状に関する既往の研究としては、40℃において車輪走行による繰り返し載荷試験を行い、再生骨材の劣化程度とひび割れ抵抗性の関係を明らかにした例[32]があるが、この方法では走行回数500回毎にひび割れ率を計測する必要があり、時間と手間を要する。

ひび割れ抵抗性や疲労抵抗性の評価方法としては、舗装調査・試験法便覧 B018T 曲げ疲労試験が用いられるが、試験機の構造上、高温では試験を行うことができない。

そこで、高温域(40℃)の疲労抵抗性を評価する試験として、フランスでの使用事例が多い2点繰り返し曲げ試験「Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens : EN12697-24」[41]を適用した。試験装置を**写真-3-2**、供試体の寸法および設置状況を**写真-3-3**に示す。2点繰り返し曲げ試験では、拘束治具は上下の2点であり、拘束部以外の箇所破壊する仕組みであるため、拘束による破損が生じず、40℃での試験が可能である。

試験には、**表-3-10**に示すように、改質II型再生骨材を用いた再生混合物を用いた(配合は**表-3-9**)。試験法便覧 B003 ホイールトラッキング試験用の供試体(300×300×100mm)を作製した後、**図-3-27**に示すような寸法の四角錘台を切り出した。試験条件は**表-3-12**に示すとおりである。

なお、本試験は、EN12697-24に記載されている供試体寸法の誤差範囲を満足する供試体を試験に使用しているが、誤差範囲を満足していても、特に供試体の上底および下底の水平が取れていない場合に試験誤差が大きくなる傾向があった。このため、試験は6つの供試体について試験を行い、上限下限の試験値を除いた4供試体の試験値を採用している。また、試験は、試験温度±1.0℃に保つことのできる恒温槽を40℃に設定して実施し、供試体を2時間養生した後に試験を開始し、同恒温槽において試験を実施した。

2点繰り返し曲げ試験から得られた結果を**図-3-28**に示す。再生骨材の劣化程度が進行するほど、また配合率が増加するほど、疲労破壊回数は低下する傾向が確認された。その傾向は、再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約5%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数は10～15%低下した。

この試験から得られたスティフネスの結果を**図-3-29**に示す。針入度が同じ場合、再生骨材配合率が同じ場合、いずれにおいても再生混合物の疲労破壊回数が小さいほどスティフネスが大きくなる傾向が見られた。

これは再生混合物の硬質化を示唆していると考えられる。再生用添加剤を加えて針入度を70にしたことで常温域(25℃)の硬さは同じになったが、高温域(40℃)では硬質化は改善されずに疲労抵抗性が低下したと考えられる。

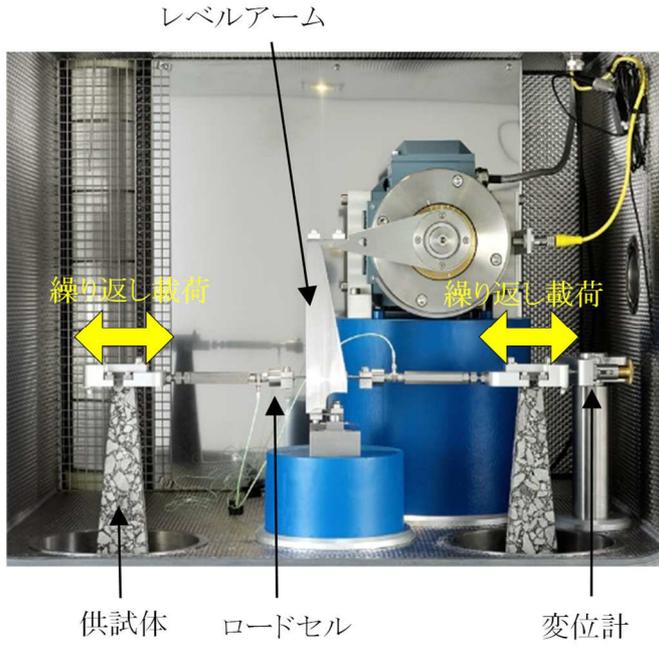


写真-3-2 2点繰り返し曲げ試験機

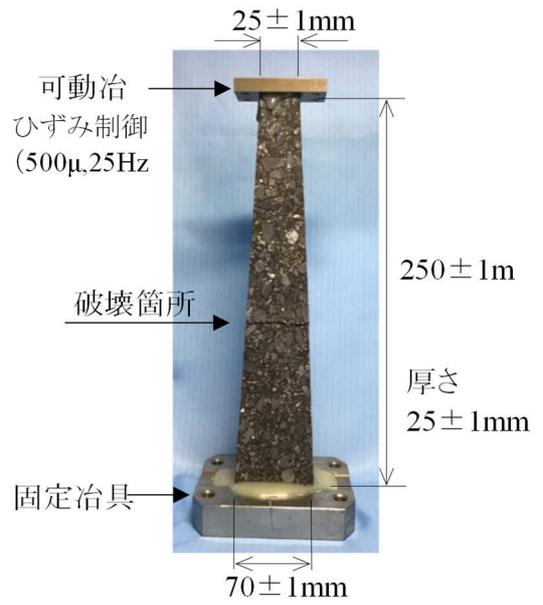


写真-3-3 2点繰り返し曲げ試験用供試体

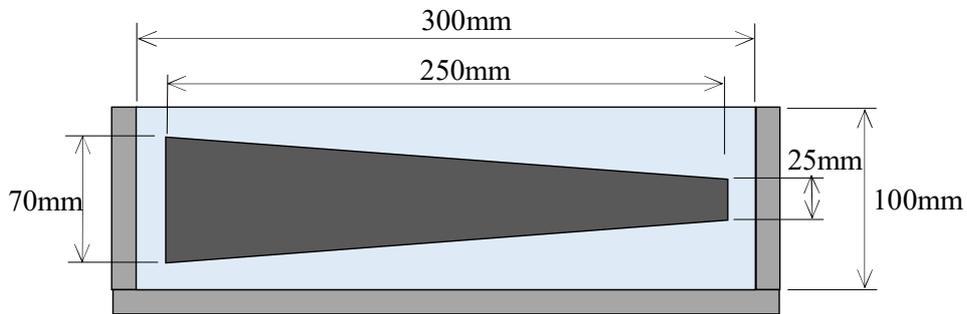


図-3-27 2点繰り返し曲げ試験用供試体の作製方法

表-3-11 2点繰り返し曲げ試験に用いた再生混合物

項目	実施内容	項目	実施内容
混合物種	密粒度(13)	目標針入度	70(1/10mm)
再生骨材のアス種	改質Ⅱ型	再生骨材の劣化程度	Pen=14 Pen=20 Pen=27
混合物のアス種	ストアス60/80	再生骨材配合率	30, 50, 70(%)

表-3-12 2点繰り返し曲げ試験の条件

試験温度	载荷速度	ひずみ量	波形
40°C	25Hz	500 μ	正弦波

※. 破壊回数：最大ステイフネスの50%になった時の载荷回数

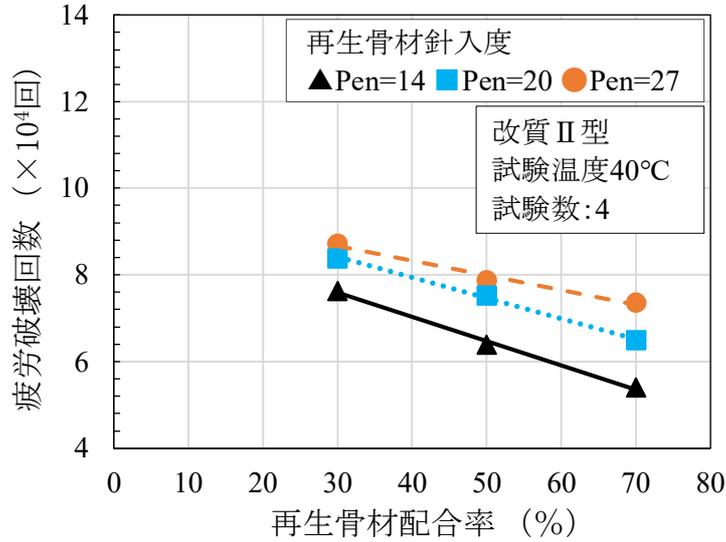


図-3-28 高温域 (40°C) における再生混合物の疲労特性

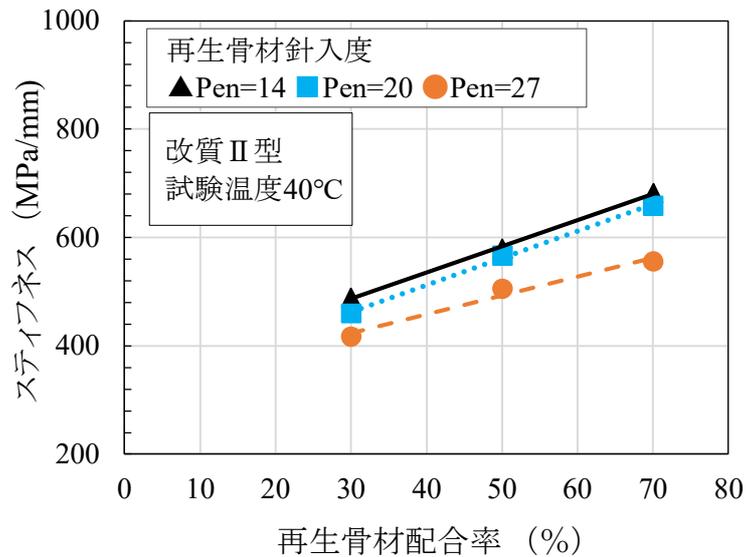


図-3-29 高温域 (40°C) における再生混合物のステイフネス

3.6.4 低温域における評価方法

検討の初めに，高温域における検討で用いたものと同じ再生混合物（表-3-10）に対して，表-3-13に示す試験条件でB018T曲げ疲労試験を行った．試験温度は一般的に曲げ疲労試験が行われている10℃と25℃で実施した．試験温度が10℃（図-3-30）と25℃（図-3-31）のいずれの場合でも，再生骨材配合率が増加すると疲労破壊回数も増加する傾向が認められ，既往の研究とも同様の結果が得られた[25][26][27]．これは実道の供用状況とは傾向が異なる結果である[28][29][30][31]．

表-3-13 B018T曲げ疲労試験の試験条件

試験温度	载荷速度	ひずみ量	波形
10,25℃	5Hz	400μ	正弦波

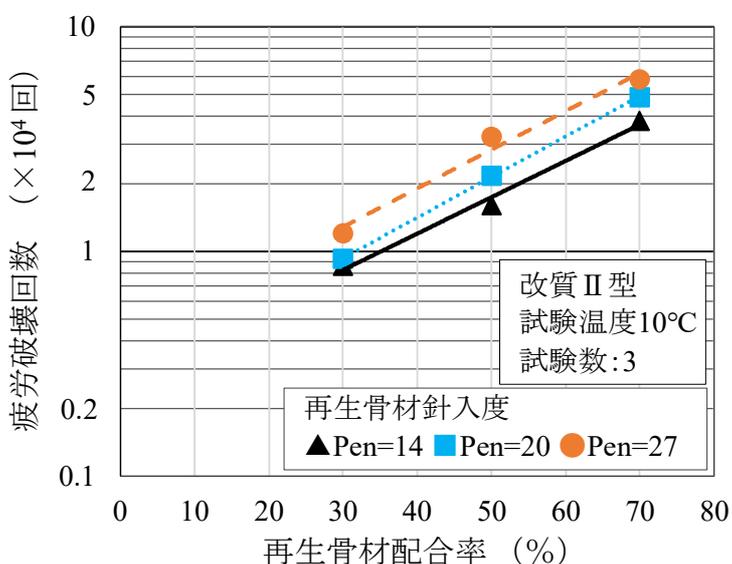


図-3-30 B018T曲げ疲労試験の結果（10℃）

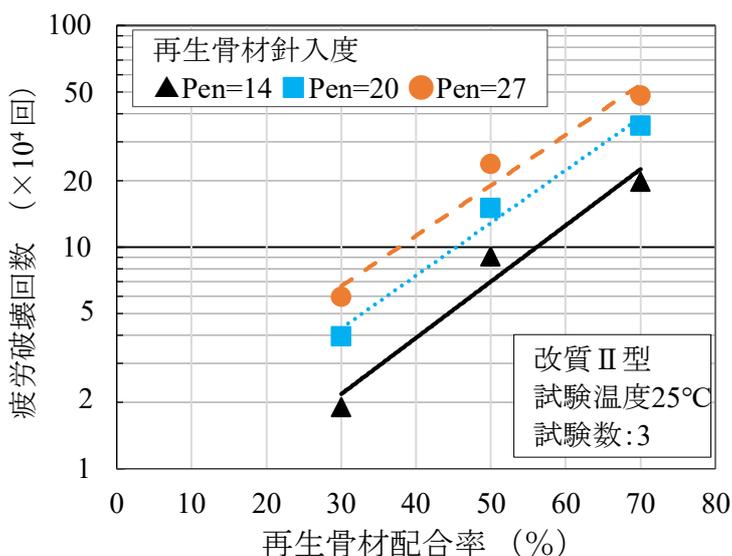


図-3-31 B018T曲げ疲労試験の結果（25℃）

図-3-2 および図-3-3 に示したとおり、再生アスファルトは、針入度が小さく再生用添加剤の添加量が多い場合に軟質化する。このため、再生骨材の針入度が低いものほど再生混合物の低温域のスティフネスは小さくなると考えられる。

B018T 曲げ疲労試験のようなひずみ制御の疲労試験では、スティフネスが小さくなると応力負荷が少なくなるため、疲労破壊回数が増加する場合がある。

したがって、スティフネスの低下が懸念される場合の検討方法としては、応力制御で試験を行う必要があることから、本研究では、応力制御による疲労試験が適切であると考える。

そこで、曲げ破断と引張破断を複合した破壊作用を再現できる SCB 試験と、これを応力制御によって繰り返し载荷することができる新たな試験方法として Nottingham Asphalt Tester (写真-3-4) を使用した Indirect Tensile Stiffness Modulus : BS EN 12697-24 (ITSM) 試験[41]を組み合わせた試験方法 (以下、NAT-SCB 試験) を考案した。

ITSM 試験は円柱試験体を用いた繰り返し間接引張試験であるが、NAT-SCB 試験は、写真-3-5 に示すような SCB 試験用の供試体を用いた荷重制御による疲労試験である。試験は、常温域と高温域の試験で用いた再生混合物 (表-3-10) について、表-3-14 の条件で実施した。

なお、本試験は、ジャイレトリーによって締め固めた円柱供試体から4つの試験用供試体が採取できるため、試験個数を4つとしている。しかし、試験法 (AASHTO TP 124-18) にも記載されているが、ノッチ部に粗骨材がある供試体は使用せず、改めて供試体を作製し試験を行っている。

また、試験は、試験温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ に保つことができる恒温槽を 10°C に設定し、供試体を2時間養生した後に試験を開始し、試験は同恒温槽内で実施した。

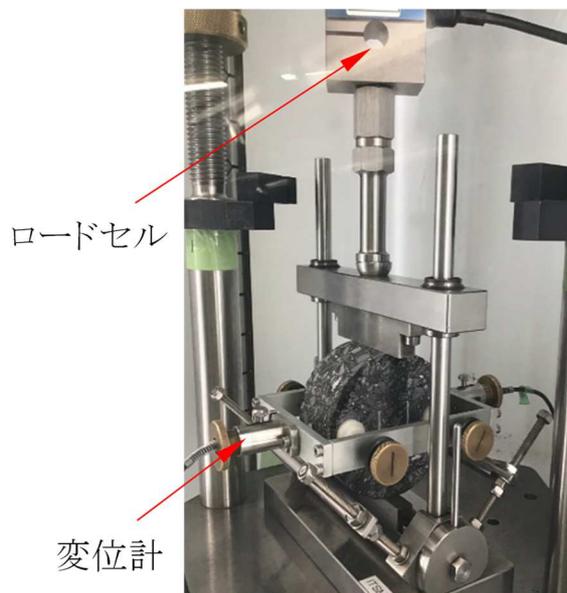


写真-3-4 Nottingham Asphalt Tester (NAT)

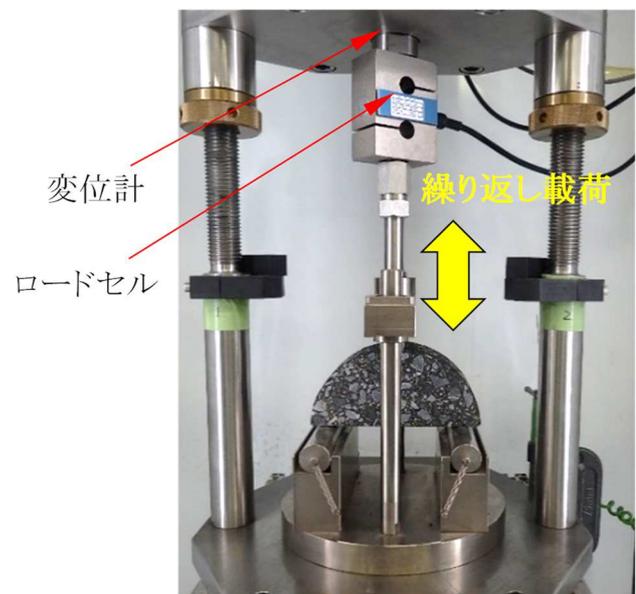


写真-3-5 NAT-SCB 試験

試験結果を図-3-32に示すとおりであり，再生骨材の劣化程度が進行するほど，また配合率が増加するほど，疲労破壊回数は低下する傾向が確認された。

その傾向は，再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約20%低下し，再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数が20～50%低下した。

また，NAT-SCB試験から得られたスティフネスの結果（図-3-33）は，図-3-32の疲労破壊回数の結果と同様の傾向を示していることから，疲労抵抗性の低下はスティフネスの低下が影響したものと考えられる。

表-3-14 NAT-SCB試験の試験条件

項目	設定値
試験温度	10℃
载荷モード	荷重制御
荷重	1600N
周波数	2Hz
波形	ハーバーサイン波
ポアソン比	0.35

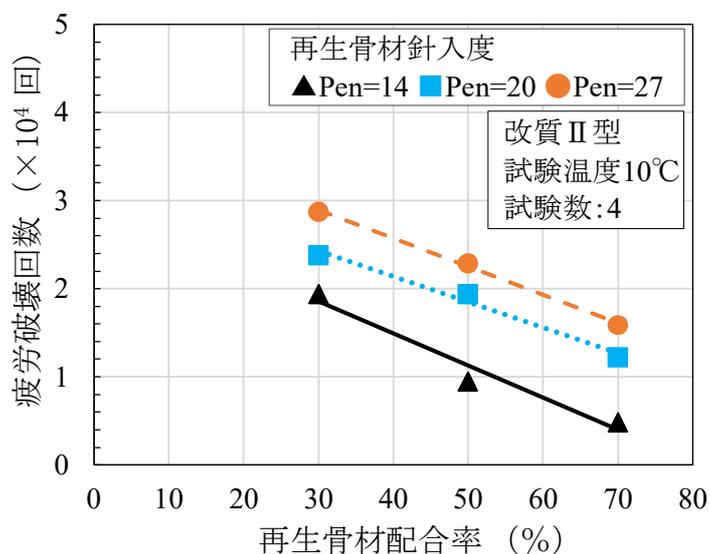


図-3-32 低温域（10℃）における再生混合物の疲労特性

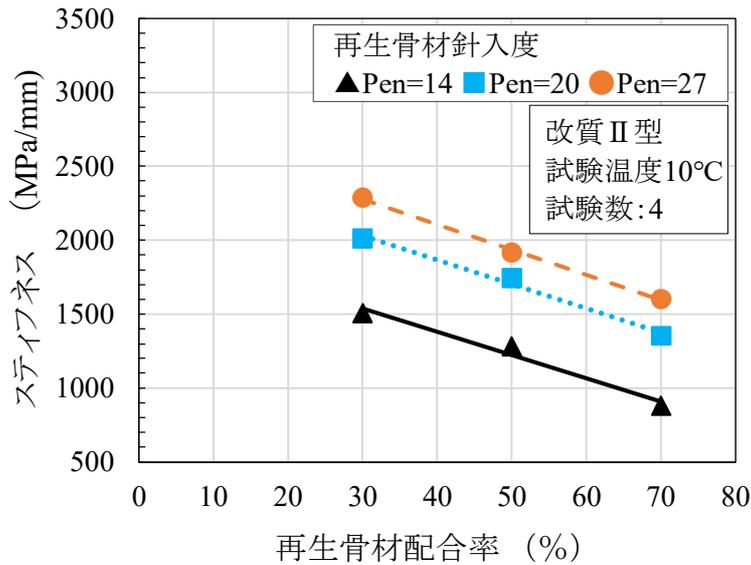


図-3-33 低温域（10°C）における再生混合物のスティフネス

以上の結果から、常温域（25°C）では、SCB試験から得られる破壊エネルギー G_f によって、再生骨材の劣化程度や配合率が再生混合物に及ぼす影響を評価できることが分かった。

また、再生混合物は再生骨材や再生用添加剤を用いるため、高温域では再生混合物の硬質化が改善されないこと、低温域では再生混合物のスティフネスが低下することで疲労抵抗性が低下することが分かった。

これらの低下割合は、高温域の場合は再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は5%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数は10~15%低下した。また、低温域の場合は再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は20%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数は20~50%低下することが分かった。

また、再生骨材の針入度が14に低下した場合でも、再生骨材の割合を30%にまで低下させることで、針入度が20および27の再生骨材配合率が50%以上の場合と同等の破壊回数となることが分かる。つまり、劣化した再生骨材であっても配合率を低下させることで再生混合物の品質を担保できる可能性があることを示したものであり、このことは再生骨材の低針入度化が進む現状において重要な知見である。

3.7 再生用添加剤および新規アスファルトの影響

3.7.1 再生用添加剤の添加量の影響

再生用添加剤が再生混合物の力学性状に及ぼす影響を検討するため、再生用添加剤量を変化させて SCB 試験を実施した。対象とした再生混合物は、表-3-10 で示した、再生骨材（改質 II 型）を用いた密粒度アスファルト混合物（13）、再生骨材配合率は 50%、試験条件は表-3-15 に示すとおりである。なお、再生混合物の最適アスファルト量と再生骨材のアスファルト（以後、旧アス）量は固定し、再生用添加剤の増量分だけ新規アスファルトを減らした。新旧アスファルトと再生用添加剤の配合率、再生混合物のマーシャル性状値、再生アスファルトの針入度は表-3-16 のとおりである。

SCB 試験の結果から得られた再生用添加剤の添加量と破壊エネルギー G_f の関係を図-3-34 に示す。添加量が増加するほど G_f 、すなわち再生混合物のひび割れ抵抗性が低下することが分かる。針入度が高い再生骨材を用いた再生混合物の方が G_f が小さくなったが、これは、同じ添加量では針入度が大きい再生骨材を使用した再生混合物の方が軟らかくなるためである。添加量ではなく針入度を同一とした場合、例えば、表-3-16 において針入度が約 40 となるのは Pen=14 では添加量が 15%、Pen=27 では 5%であり、これを図-3-34 に適用すると針入度が大きい再生骨材（Pen=27）を使用した混合物は G_f が大きくなる。

表-3-15 再生用添加剤の影響（試験条件）

項目	条件
試験方法	SCB試験
再生用添加剤の添加量※	0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%
再生骨材配合率 (%)	50%
再生骨材針入度 (1/10mm)	Pen=14, Pen=27
再生骨材のアスファルト種	改質 II 型
試験温度 (°C)	25°C

※対旧As質量%

表-3-16 再生用添加剤の影響（配合）

再生骨材 針入度	再生用添加剤量 (対旧アス質量%)	0%	5%	10%	15%	20%	30%	
Pen=14	アス ^{※1} 配合	再生用添加剤 (%)	0.00	0.13	0.27	0.41	0.54	0.82
		新アス (%)	3.19	3.06	2.92	2.78	2.65	2.37
		旧アス (%)	2.71					
		OAC (%)	5.90					
	針入度 ^{※2} (1/10mm)	14	21	29	43	57	115	
	再生 混合物	密度 (g/cm ³)	2.328	2.336	2.341	2.344	2.345	2.350
		空隙率 (%)	4.8	4.4	4.2	4.0	3.9	3.6
飽和度 (%)		73.3	75.1	76.1	76.8	77.2	78.6	
Pen=27	アス ^{※1} 配合	再生用添加剤 (%)	0.00	0.14	0.28	0.42	0.56	0.83
		新アス (%)	2.92	2.78	2.64	2.50	2.36	2.09
		旧アス (%)	2.78					
		OAC (%)	5.70					
	針入度 ^{※2} (1/10mm)	27	47	68	103	152	321	
	再生 混合物	密度 (g/cm ³)	2.336	2.344	2.348	2.350	2.352	2.356
		空隙率 (%)	4.7	4.3	4.1	3.9	3.8	3.6
飽和度 (%)		73.2	75.0	76.0	76.7	77.1	78.2	

※1アス配合は混合物に対する質量%(新アスはストアス60/80)

※2針入度は旧アスに再生用添加剤を調合した値

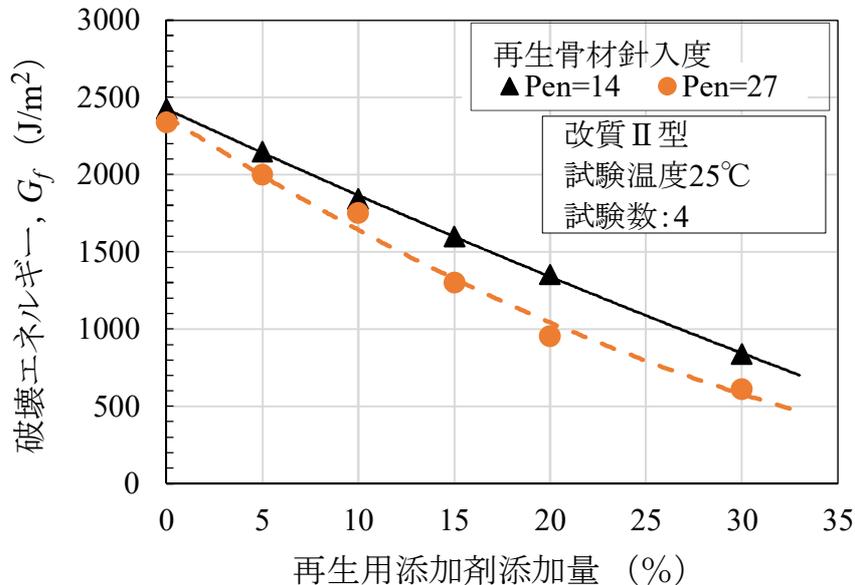


図-3-34 再生用添加剤の添加量と G_f の関係

3.7.2 アスファルト量の影響

次に，再生混合物のアスファルト量の影響を明らかにするために，最適アスファルト量を中心に±0.5%変化させてSCB試験を行った．新旧アスファルトと再生用添加剤の配合率，混合物のマーシャル性状値，再生アスファルトの針入度は表-3-17に示すとおりである．なお，アスファルト量が増えたり減っても針入度が変わらないように，旧アスファルト量と再生用添加剤量を固定し，新規アスファルト量のみを変化させた．再生混合物のアスファルト量と G_f の関係を図-3-35に示す．アスファルト量が増えると G_f も増加する傾向が見られるが，図-3-34ほどではないことから，アスファルト量よりも再生用添加剤の方が再生混合物のひび割れ抵抗性に及ぼす影響が大きいことが分かる．

表-3-17 アスファルト量の影響（配合）

再生骨材 針入度	総アスファルト量 (%)	5.40	5.90	6.40	
Pen=14	アス ^{※1} 配合	再生用添加剤 (%)	0.64	0.63	0.63
		新アス (%)	2.03	2.56	3.07
		旧アス (%)	2.73	2.71	2.70
	針入度 ^{※2} (1/10mm)	69	70	71	
	再生 混合物	密度 (g/cm ³)	2.331	2.347	2.362
		空隙率 (%)	5.2	3.9	2.5
		飽和度 (%)	70.1	77.6	85.3
Pen=27	総アスファルト量 (%)	5.20	5.70	6.20	
	アス ^{※1} 配合	再生用添加剤 (%)	0.29	0.29	0.29
		新アス (%)	2.12	2.63	3.15
		旧アス (%)	2.79	2.78	2.76
	針入度 ^{※2} (1/10mm)	70	70	71	
	再生 混合物	密度 (g/cm ³)	2.333	2.349	2.364
		空隙率 (%)	5.4	4.0	2.8
飽和度 (%)		68.4	76.1	83.7	

※1アス配合は混合物に対する質量%(新アスはストアス60/80)

※2針入度は旧アスに再生用添加剤と新アスを調合した値

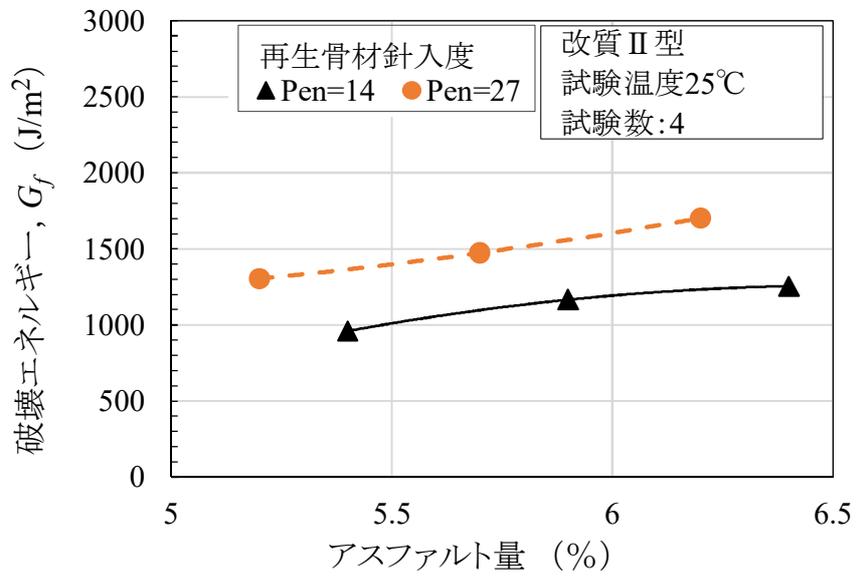


図-3-35 再生混合物のアス量と G_f の関係

3.7.3 新規アスファルトの種類の影響

新規アスファルトの種類が再生混合物に及ぼす影響について検討するために、新規アスファルトをストアス 60/80 とストアス 80/100 の 2 種類について、表-3-18 に示す条件で SCB 試験を行った。なお、再生混合物の最適アスファルト量と旧アスファルト量は固定し、新規アスファルトと再生用添加剤の配合を調整することで針入度を 70 にした。新旧アスファルトと再生用添加剤の配合率、再生混合物のマーシャル性状値、再生アスファルトの針入度は表-3-19 に示すとおりである。

新規アスファルト種類と G_f の関係を図-3-36 に示す。針入度 80/100 の新規アスファルトを用いた再生混合物の G_f は、再生骨材の配合率や針入度に関わらず、針入度 60/80 よりも 20% 程度高くなった。これは、針入度の高いアスファルトを使用するほど、再生用添加剤の添加量が少なくなるためと考えられる。このことから、再生混合物のひび割れ抵抗性を高めるには、針入度の高い新規アスファルトを用いることが有効であることが分かる。

表-3-18 新規アスファルト種類の影響(試験条件)

項目	条件
再生骨材配合率 (%)	30%, 50%, 70%
再生骨材針入度 (1/10mm)	14, 27
再生骨材のアスファルト種類	改質 II 型
試験温度 (°C)	25°C

表-3-19 新規アスファルト種類の影響（配合）

再生骨材 針入度	ストアス種類		60/80			80/100			
	再生骨材配合率		30%	50%	70%	30%	50%	70%	
Pen=14	アス 配合	再生用添加剤 (%)	0.38	0.63	0.88	0.31	0.51	0.71	
		新アス (%)	3.99	2.56	1.13	4.06	2.68	1.30	
		旧アス (%)	1.63	2.71	3.79	1.63	2.71	3.79	
		OAC (%)	6.00	5.90	5.80	6.00	5.90	5.80	
	目標針入度 (1/10mm)		70						
	再 生 混合物	密 度 (g/cm ³)	2.344	2.347	2.35	2.343	2.346	2.35	
		空隙率 (%)	3.9	3.9	3.8	4.1	4.1	4.10	
		飽和度 (%)	77.6	77.6		76.3	76.6	76.90	
	Pen=27	アス 配合	再生用添加剤 (%)	0.17	0.29	0.41	0.13	0.21	0.29
			新アス (%)	3.96	2.63	1.30	4.00	2.71	1.42
旧アス (%)			1.67	2.78	3.89	1.67	2.78	3.89	
OAC (%)			5.80	5.70	5.60	5.80	5.70	5.60	
目標針入度 (1/10mm)		70							
再 生 混合物		密 度 (g/cm ³)	2.346	2.349	2.351	2.342	2.347	2.35	
		空隙率 (%)	4.1	4.0	4.0	4.3	4.2	4.1	
		飽和度 (%)	75.9	76.1	76.3	75.4	75.5	75.7	

アスファルト配合は、混合物に対する質量%を示す

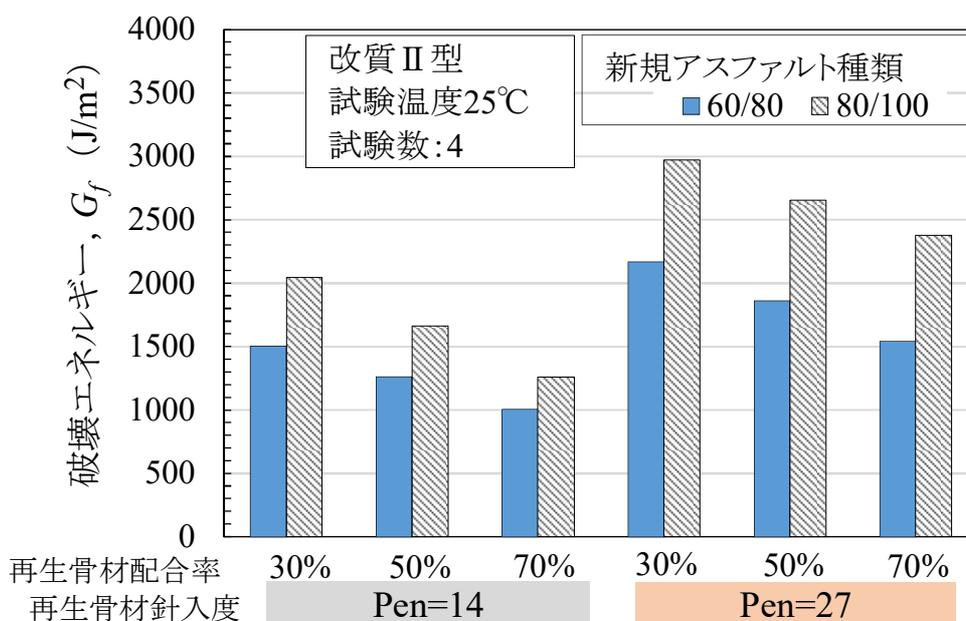


図-3-36 新規アスファルト種類と G_f の関係

3.8 結論

本研究では、再生混合物の力学性状を評価するため、海外の試験方法を改良し、それを用いて再生骨材、再生用添加剤、新規アスファルトの種類や量が再生混合物の力学性状に及ぼす影響を明らかにした。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 再生アスファルトは、劣化が進行した（針入度が低い）アスファルトほど、25℃より高温側では針入度が低くなり、低温側では高くなる傾向があり、アスファルトの劣化の進行に伴い、25℃よりも高温では硬質化し、低温では軟質化する（感温性が高くなる）ことが明らかとなった。
- 常温域（25℃）における再生混合物のひび割れ抵抗性を評価するために SCB 試験を用いた。SCB 試験から得られる柔軟性指数 FI と破壊エネルギー G_f には強い相関が見られたことから、 G_f によって常温におけるひび割れ抵抗性を評価できることが分かった。再生骨材の劣化程度と再生骨材配合率を変化させて G_f を求めたところ、再生骨材の劣化が大きく、再生骨材配合率が増加するほど、 G_f 、すなわち、ひび割れ抵抗性が低下することが分かった。
- また、SCB 試験の G_f と圧裂試験の変位－荷重曲線から求めた G_f には強い相関があることから、 G_f を用いることで圧裂試験によってもひび割れ抵抗性を評価できることが分かった。
- 再生混合物の高温域（40℃）における疲労抵抗性の評価には 2 点繰り返し曲げ試験、低温域（10℃）における疲労抵抗性の評価には NAT-SCB 試験を用いた。その結果、高温域では、再生骨材配合率が 10% 増加すると疲労破壊回数は約 5% 低下し、再生骨材の針入度が 20 から 14 になると疲労破壊回数は 10～15% 低下する一様の傾向が確認された。また、低温域では、再生骨材配合率が 10% 増加すると疲労破壊回数は約 20% 低下し、再生骨材の針入度が 20 から 14 になると疲労破壊回数が 20～50% 低下した。また、再生骨材の針入度が 14 に低下した場合でも、再生骨材の割合を 30% にまで低下させることで、針入度が 20 および 27 の再生骨材配合率が 50% 以上の場合と同等の破壊回数となることが分かる。つまり、劣化した再生骨材であっても配合率を低下させることで再生混合物の品質を担保できる可能性があることを示したものであり、このことは再生骨材の低針入度化が進む現状において重要な知見である。
- 再生用添加剤の添加量を変化させて SCB 試験を行ったところ、添加量が増加するほど G_f が低下することが分かった。再生混合物のアスファルト量を変化させたところ、アスファルト量の増加に伴って G_f も増加する傾向が見られたが、再生用添加剤の影響ほど大きくはなかった。再生混合物に加える新規アスファルトを、ストアス 60/80 とストアス 80/100 の 2 種類について SCB 試験を行った結果、再生混合物のひび割れ抵抗性を高めるには、針入度の高い新規アスファルトを用いることが有効であることが分かった。

第 3 章の参考文献

- [1]一般社団法人日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報 2019.
- [2]新田弘之，佐々木 巖，西崎到，川上篤史，久保和幸：アスファルト・コンクリート塊の持続的なりサイクル土木技術資料,pp.14-17,53-4, 2011.
- [3]安崎裕,片倉弘美,高木信幸：再生加熱アスコンの供用性評価,土木技術資,31-9, pp.48-53, 1989.
- [4]中村俊行,久保和幸,東嶋奈緒子：アスファルト発生材の再生限界に関する試験調査,第 20 回日本道路会議,779,pp.916-917, 1993.
- [5]Part7 再生舗装 No.11～13,舗装,2000.12
- [6]再生アスファルト舗装の供用性,舗装,pp.9-11,1990.12
- [7]Hveem,F.N.and Carmany,R.M.:The Factors Underlying the Rational Design of Pavement, HRB Research Record,No.28,pp.101-136,1948
- [8]Deacon,J.A:Fatigue of Asphalt Concrete, Doctoral Dissertation, University of California,Berkeley,1965.
- [9]Santucci,L.E. and Schmidt,R.J.:The Effect of Asphalt Properties on the Fatigue Resistance of Asphalt Paving Mixture, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists,Vol.38,pp.65-97,1969
- [10]Van Dijk, W. and Visser,W.: The Energy Approach for Pavement Design, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists,Vol.46,pp.1-40,1977.
- [11]Bituminous Mixtures –Test methods for hot mix asphalt Part 24:Resistance to fatigue. 「Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens」 EN 12967-24,2018.
- [12]Read,J.M.and Collop,A.C.: Practical Fatigue Characterization of Bituminous Paving Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,Vol.66,pp.74-108,1997.
- [13]British Standard Institution: Method for the Determination of the Fatigue Characteristics of Bituminous Mixtures Using Indirect Tensile Fatigue, Draft for Development ABF,1995.
- [14]Roque,R.,Buttlar,W.G.,Ruth,B.E.,Tia,M.,Dickison,S.W.and Reid,B.: Evaluation of SHRP Indirect Tension Tester to Mitigate Cracking in Asphalt Pavements and Overlays, Fonal Report to the Florida Department of Transportation,1997.
- [15]Di Benedetto,H.,de La Roche,C.,Baaj,H.,Pronk,A.,and Lundstrom,R.:Fatigue of Bituminous Mixtures, RILEM TC 182-PEB ‘Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials’, Materials and Structures,Vol.36,pp.202-216,Apr.,2004.
- [16]Lytton,R.L.,Uzan,J.,Fernando,E.G.,Roque,R.,Hiltunen,D.and Stoffels,S.M.:Development and Validation of Performance Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes, Strategic Highway Research Program,Report No.SHRP-A-357,National Research Council,Washington,DC,1993.
- [17]向後憲一,姫野賢治：載荷波形および休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響,土木学会舗装工学論文集,Vol.12,pp.83-89,2007.
- [18]向後憲一,姫野賢治：アスファルト混合物の一軸疲労試験,土木学会第 62 回年次学術講演会概要集,pp.583-584,第V部,V-292,2007.
- [19]Kogo,K.and Himeno,K:The Effects of Different Waveforms and Rest Period in Cyclic Loading on the Fatigue Behavior of the Asphalt Mixtures,Sixth RILEM International Conference on Cracking in Pavement,Talor&Francis,pp.509-517,2008.

- [20]向後憲一,和地敬,姫野賢治:アスファルト混合物の疲労限界に関する検討,土木学会第 63 回年次学術講演会概要集,第V部,V-37,2008.
- [21]AASHTO TP 124-18 Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test.
- [22]Impact of High Recycled Mixes on HMA Overlay Crack Development Rate, Road Materials and Pavement Design 2017.
- [23]日本道路協会:舗装再生便覧(平成 22 年版)
- [24]向後憲一:載荷条件の違いに着目したアスファルト混合物の疲労挙動に関する研究,博士論文,中央大学,2009.
- [25]鈴木義昭,向後憲一:再生アスファルト混合物の力学性状について,第 16 回日本道路会議論文集,496,1985
- [26]菊池力斗木村清和,高橋修,清水忠昭,田口仁:再生アスファルト混合物の疲労特性の評価方法,土木学会第 73 回年次学術講演会,pp.1289-1290,2018.8
- [27]三瀬貞,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研究,第 15 回日本道路会議,494,1983
- [28]安崎裕,片倉弘美,高木信幸:再生加熱アスコンの供用性評価,土木技術資,31-9,pp.48-53,1989.
- [29]中村俊行,久保和幸,東嶋奈緒子:アスファルト発生材の再生限界に関する試験調査,第 20 回日本道路会議, 779,pp.916-917, 1993.
- [30]Part7 再生舗装 No.11~13,舗装,2000.12
- [31]再生アスファルト舗装の供用性,舗装,pp.9-11,1990.12
- [32]加納孝志,小杉真平,湯川誠二郎:高温時の再生アスファルト混合物の疲労抵抗性の評価に関する検討,第 33 回日本道路会議,3017,2019.11
- [33]田湯文将,新田弘之,川上篤史,川嶋陽子: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,3055,2019.
- [34]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.208,2001
- [35]Claessen,A,I,M.,Edwards,J,M.,Sommer,P.and Uge,P.:Asphalt Pavement Design, The Shell Method,Preceedings of Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements,pp.37-94,1977
- [36]丸山暉彦,渡辺隆,吉原一彦,アスファルト混合物の疲労破壊包絡線,土木学会論文報告集,No.306,pp.71-78,1981
- [37]佐藤信彦:舗装の維持修繕,建設図書,1992.5
- [38]阿部頼政:舗装工学,社団法人土木学会,丸善,1995.2
- [39]Imad L. Al-Qadi,Hansen Ozer,John Lambros:Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS,Research Report No.FHWA-ICT-15-017
- [40]吉田武,寺田剛,新田弘之:舗装の機能的破損に関する研究,平成 14 年度土木研究所成果報告書,2002 年,土木研究所ホームページ
- [41]Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens ,BS EN12697-249
- [42]横山実玲,志賀義伸,森俊八:特殊弾力性アスファルトを用いた薄層 SMA の適用性,第 33 回日本道路会議,3120,2019
- [43]Bituminous Mixtures –Test methods for hot mix asphalt Part 24:Resistance to fatigue. 「Indirect Tensile Stiffness Modulus Test」 ,BS EN 12697-24,2018.
- [44]公益社団法人日本道路協会:舗装調査・試験法便覧(B020)
- [45]日本道路協会:舗装再生便覧(平成 22 年版),pp.34
- [46]高橋修、大阪諒、尾谷力:半円形供試体曲げ試験によるアスコンのひび割れ抵抗性評価法に関する基礎的研究,ASPHALT,Vol.61,No.234,201

第 4 章

再生用添加剤の組成と添加方法が 混合物に及ぼす影響

第4章 再生用添加剤の組成と添加方法が混合物に及ぼす影響

4.1 緒言

再生混合物の配合設計は、再生用添加剤の添加量を求めるために、回収試験[1]により再生骨材からアスファルトを回収し、これに再生用添加剤を添加して、所定の針入度を調整する。この際に回収アスファルトと再生用添加剤は十分に攪拌して均一に混合される。

一方、合材プラントにおける実際の製造過程では、再生骨材からアスファルトを分離することができないため、再生骨材に再生用添加剤を直接散布する方法を一般的に行っている（以下、標準添加方式）。しかし、この方法によって添加剤が再生骨材内部にまで均一に浸透するかどうかについては確認がされていない。

木谷らの研究[2]によると、再生骨材内部に再生用添加剤が浸透するには、時間経過によって浸透状態は変化し、再生用添加剤の種類によって浸透速度が異なる報告がある。また、再生混合物は時間の経過に伴って作業性が低下することが報告されていることから[3]、添加剤の浸透状態は時間経過とともに変化すると言える。

つまり、再生用添加剤を散布した直後は再生骨材表面に添加剤濃度が高い部分が存在し、その後の経過時間に伴い、再生用添加剤が再生骨材の内部に浸透して徐々に再生用添加剤の濃度分布が均一化すると仮定した場合、設計添加量は、アスファルトに再生用添加剤を均一に溶かした状態で求める訳であるから、混合物を製造する際も均一に浸透する状態にするまで養生を行う必要があると考えた。そして、均一な浸透状態にすることで再生混合物の混合物性状を向上できる可能性があると考えた。

そこで、本研究では、再生用添加剤を加えた後、添加剤が再生骨材に浸透するまでの養生時間を変化させて、混合物性状を確認し、均一な浸透状態となる養生時間を確認することとした。

一般的には、再生用添加剤は、再生骨材を加熱した後に散布され、その後、サージビン内で0～1時間程度、保温養生した後に新規材料と混合して再生混合物を製造する。しかし、この方法で養生時間を延長すると高温の状態でも長時間養生することになるため、再生混合物の熱劣化が懸念される。このため、本研究では常温で添加剤を加えてから一定の期間を常温で養生し、その後、再生混合物を製造する方法（以下、事前添加方式）を採用した。

本章では、再生用添加剤の均一な浸透状態を確保することに着目し、標準添加方式と事前添加方式で製造した再生混合物の力学特性の違いを検証する。

一方、再生骨材の劣化が進行すると、再生用添加剤の添加量が増加することから、再生用添加剤の影響は益々大きくなると考えられる。

再生用添加剤については、前章までの研究で示したとおり、再生用添加剤の添加量や添加方法が、再生混合物のひび割れ抵抗性や疲労抵抗性に大きく影響することが確認されていることから、効果的な再生用添加剤を選定し活用すべきである。

しかしながら、再生用添加剤の規格に関しては、物性値に関しては定められているが[4]、成分に関する規格がないため、芳香族系、ナフテン系、パラフィン系などの様々な種類の添加剤が市販されているのが実態である。

既往の研究では、再生用添加剤の種類が再生混合物に及ぼす影響について多くの研究が行われており、その研究の概要については、第2章で述べてきたが、総じて言える

ことは、再生用添加剤の組成は再生混合物の力学性状に影響を及ぼし、芳香族成分を多く含む再生用添加剤は、飽和成分を多く含むものより、アスファルトの硬質化を抑制する効果が高いとされている[5][6][7][8].

また、他の研究では、繰り返し再生を行った際に再生用添加剤の組成が再生混合物の力学性状に及ぼす影響について報告されている[9][10][11][12][13][14]. この中では、飽和成分を多く含む再生用添加剤は、繰り返し再生に伴いアスファルトの伸度の低下が顕著であり、圧裂強度や圧裂変位が小さくなる傾向が見られている. 一方で、芳香族成分を多く含む再生用添加剤を使用した場合は、この傾向が少ないことから、再生用添加剤は、芳香族成分を多く含むものを使用した方が、繰り返し再生を行った際に再生混合物の性状変化が少ないと示されている.

しかしながら、既往の研究では、再生用添加剤の組成の影響を圧裂試験や曲げ試験などによって評価しており、これらの方法ではひび割れ抵抗性や疲労抵抗性は直接的に判定できない.

そこで、本章では、再生用添加剤の種類を変えて、第3章で実施したSCB試験や2点曲げ疲労試験およびNAT-SCB試験を用いて混合物性状を確認し、再生用添加剤の種類とひび割れ抵抗性と疲労抵抗性との関連を検証することとした.

さらに、前述した事前添加方式によって混合物を製造して混合物性状を確認することで、添加方式と添加剤種の影響に関して比較し、併用した場合の効果についても検証した.

4.2 再生用添加剤の組成が混合物性状に及ぼす影響の検証

4.2.1 実験概要

検討は、表-4-1に示すとおり極めて劣化した再生骨材を用いて、再生骨材配合率50%の再生密粒度アスファルト混合物を製造し、第3章で実施したSCB試験(25℃)、2点繰り返し曲げ試験(40℃)、NAT-SCB試験(10℃)によって、再生混合物の力学特性を確認した。

再生用添加剤の種類は、市販されている添加剤が、芳香族成分と飽和成分を主成分とする添加剤が多いため、本研究では表-4-2芳香族成分の量が異なる3種の再生用添加剤を選定し検討に用いた。

添加剤の性状および各添加剤の針入度70となる添加量は、表-5-2に示すとおりである。また、最適アスファルト量は、再生用添加剤の種類が変わっても同等とし、混合物の配合は、表-4-3に示すとおりである。

表-4-1 再生骨材の性状

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 (°C)		73.5

表-4-2 再生用添加剤の性状

項 目		添加剤A	添加剤B	添加剤C
		飽和分系	芳香族系	植物油系
動粘度 (60℃)	(mm ² /s)	83.1	481.0	88.5
引火点	(℃)	274	326	268
薄膜加熱後の粘度比	(%)	1.08	1.10	1.06
薄膜加熱質量変化率		-0.76	-0.05	-0.68
密度(15℃)	(g/cm ³)	0.928	0.974	0.908
飽和分	(mass%)	33.9	23.9	78.6
芳香族分	(mass%)	65.0	73.1	14.8
レジン分	(mass%)	1.0	2.8	5.0
アスファルテン分	(mass%)	0.1	0.2	0.9
再生用添加剤 添加量	(%)	19.7	28.8	24.2

※. 再生用添加剤 添加量: 針入度70となる再生用添加剤量

表-4-3 再生混合物の配合

項 目	種 類	添加剤A	添加剤B	添加剤C
骨材配合 (%)	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		
アスファルト量 (%)	最適アスファルト量	5.80	5.80	5.80
	新アス(60/80)	2.71	2.48	2.60
	旧アス	2.58	2.58	2.58
再生用添加剤	(%)	0.51	0.74	0.62

4.2.2 試験結果

SCB 試験の結果は、図-4-1(柔軟性指数, FI)と図-4-2(破壊エネルギー, G_f)に示すとおりである。

この結果, FI は添加剤 A=添加剤 B>添加剤 C, G_f は添加剤 A>添加剤 B>添加剤 C 順序で大きく, 一概に芳香族成分の量と一致しない結果となった。

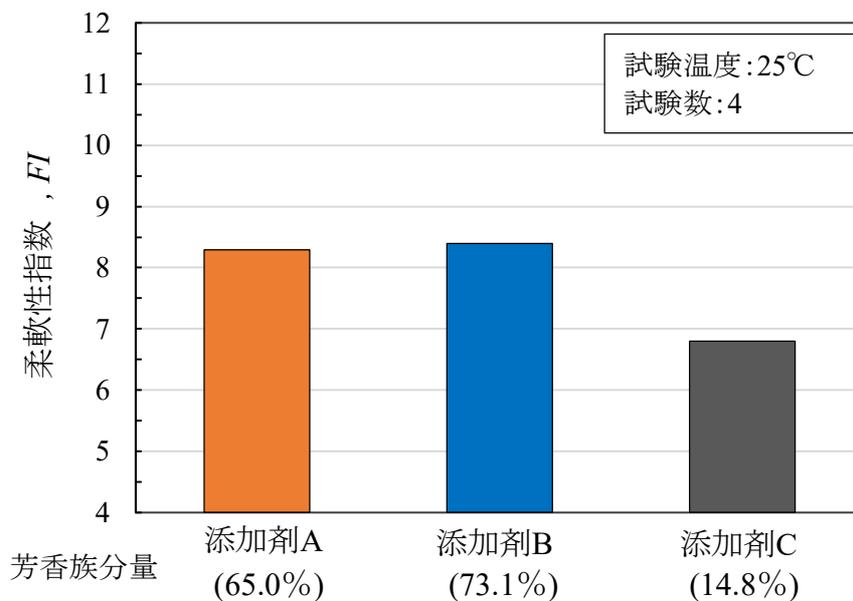


図-4-1 再生用添加剤の種類と柔軟性指数, FI

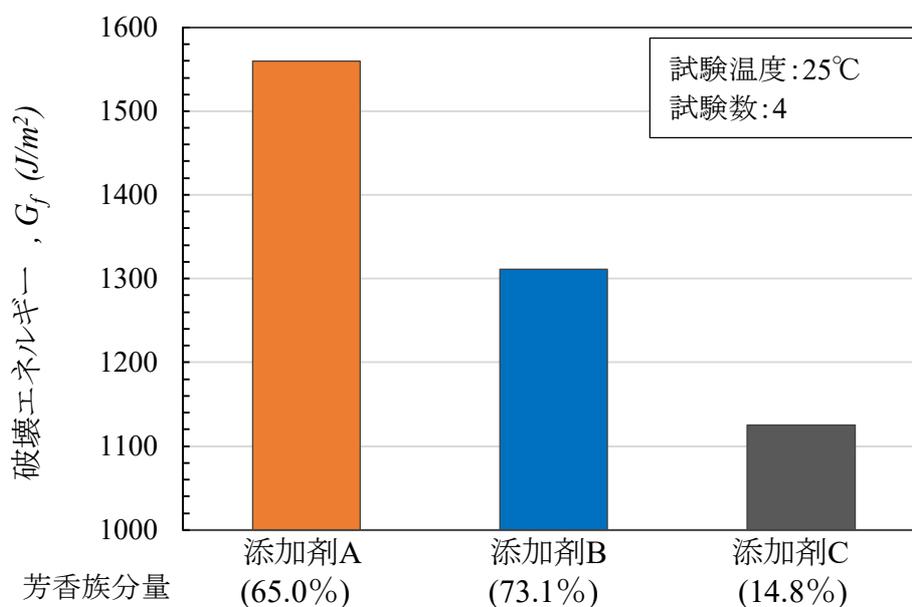


図-4-2 再生用添加剤の種類と破壊エネルギー, G_f

次に、2点繰り返し曲げ試験(40℃), NAT-SCB 試験(10℃)の結果は、それぞれ図-4-3と図-4-4に示すとおりであり、高温域の疲労抵抗性は、添加剤種の影響は少ないものの、低温域では添加剤の種類によって大きな差異があり、芳香族成分の多い添加剤Bは他の添加剤と比較して低温域の疲労抵抗性が2倍以上優れる結果であることを確認した。

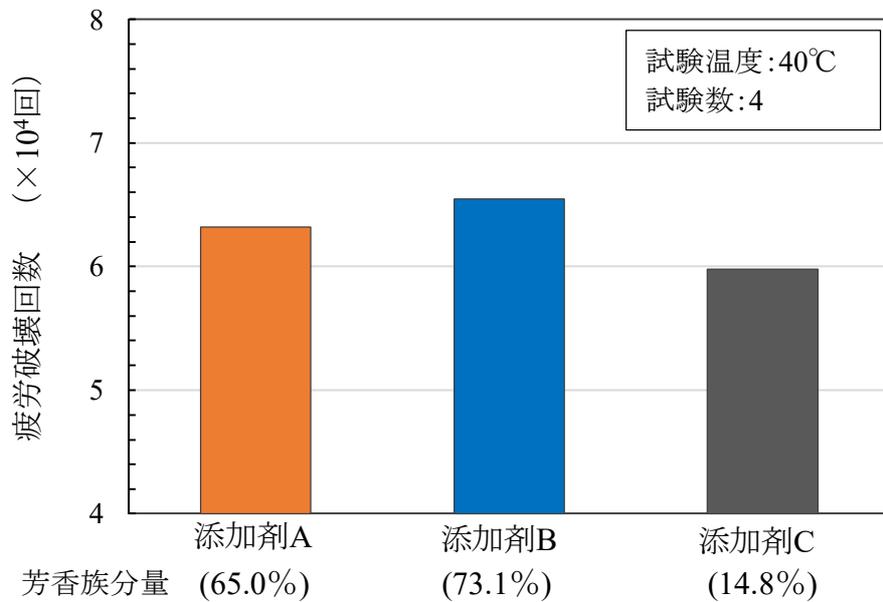


図-4-3 再生用添加剤の種類と高温域の疲労抵抗性

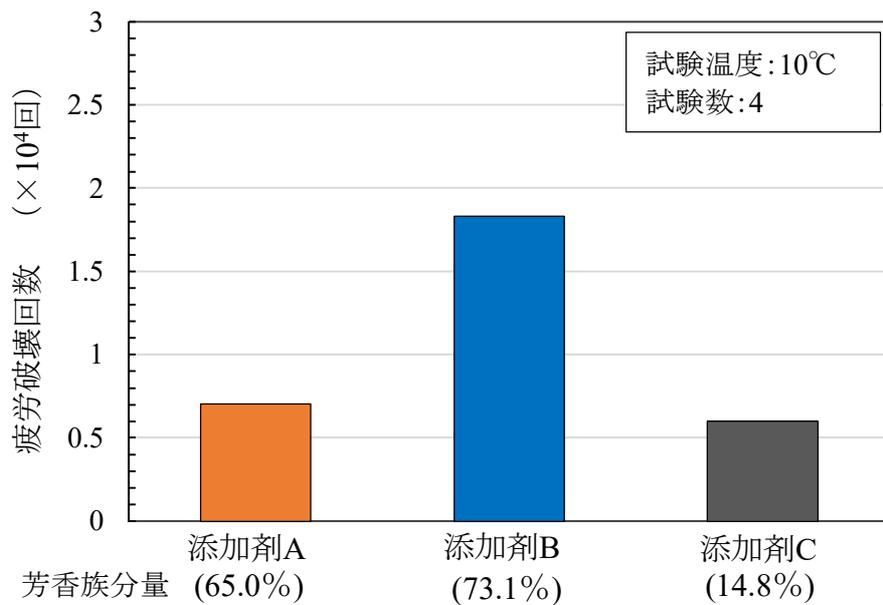


図-4-4 再生用添加剤の種類と低温域の疲労抵抗性

4.3 事前添加方式による混合物性状

4.3.1 実験概要

室内試験における標準添加方式と事前添加方式による添加方法と養生方法の違いを図-4-5に示す。

事前添加方式は、工場で採取した再生骨材（表-4-1）について、室内において20℃の再生骨材に再生用添加剤を散布し、20℃で1日、3日、7日間保管した（以下、加熱前添加）。再生用添加剤の種類は、表-4-2の再生用添加剤を検討に用いた。

ここで入荷する再生骨材の針入度は日々変化するため、加熱前添加だけでは添加量を適切に管理することが難しい。そこで、再生混合物の製造直前に再生用添加剤量を微調整できるようにするため、添加量の7割を加熱前添加、3割を加熱後添加とする方法とした。加熱前添加と加熱後添加の添加量、添加条件、養生条件は、表-4-4に示すとおりである。

なお、標準添加方式は、工場で採取した再生骨材を160℃の恒温槽で1時間加熱した後、表-4-3に示す配合で再生混合物を作製した。

試験は、第3章で実施したSCB試験(25℃)、2点繰り返し曲げ試験(40℃)、NAT-SCB試験(10℃)を用いて、再生混合物の力学特性を確認した。

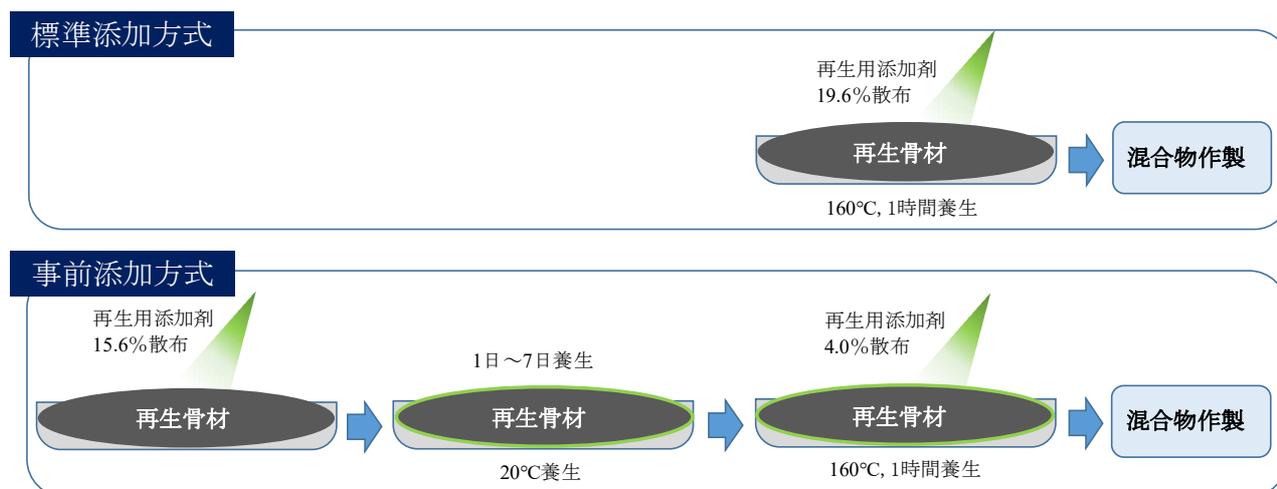


図-4-5 標準添加方式と事前添加方式の違い

表-4-4 再生用添加剤の添加方法と養生時間

再生用添加剤の添加方式	再生骨材	再生用添加剤の添加量 ^{※3} (%)			養生期間	
		添加剤A	添加剤B	添加剤C		
標準再生方式	加熱後添加 ^{※1}	加熱(160℃)	19.7	—	—	1時間
事前添加方式	加熱前添加 ^{※2}	常温(20℃)	15.7	24.8	20.2	1日、3日、7日
	加熱後添加	加熱(160℃)	4.0	4.0	4.0	1時間

※1. 加熱後添加：再生骨材を加熱後に添加剤を添加する方法

※2. 加熱前添加：再生骨材を加熱前に添加剤を添加する方法

※3. 再生用添加剤の添加量：旧アスファルトを針入度70とする添加量

4.3.2 試験結果

SCB 試験より，養生期間と FI の関係を図-4-6 に，養生期間と G_f の関係を図-4-7 に示す．いずれの添加剤も養生期間が長くなると FI および G_f は増加し，養生日数が 3 日では FI および G_f ともに標準添加方式よりも約 10~30%増加し，養生 7 日では約 20~40%増加した．

養生日数が 3 日以降は FI および G_f の増加傾向は収束することから，養生温度が 20°C の場合は，養生期間は 3 日以上必要であることが分かる．

また，再生用添加剤の種類では，添加剤 A および添加剤 B は，添加剤 C と比較して，標準添加方式(養生日数 0 日)の段階で FI および G_f が高いが，芳香族成分の少ない添加剤 C は FI および G_f ともに低く，養生日数が経過しても G_f に関しては大きな向上は期待できない結果となった．

したがって，芳香族分が多い添加剤は， FI および G_f を向上させる効果が高く，すなわち，ひび割れ抵抗性の向上に有効であると考えられる．しかし，添加剤 B は添加量や粘性が高く，これらの影響もあると考えられ，この点の解明は今後の検証課題である．

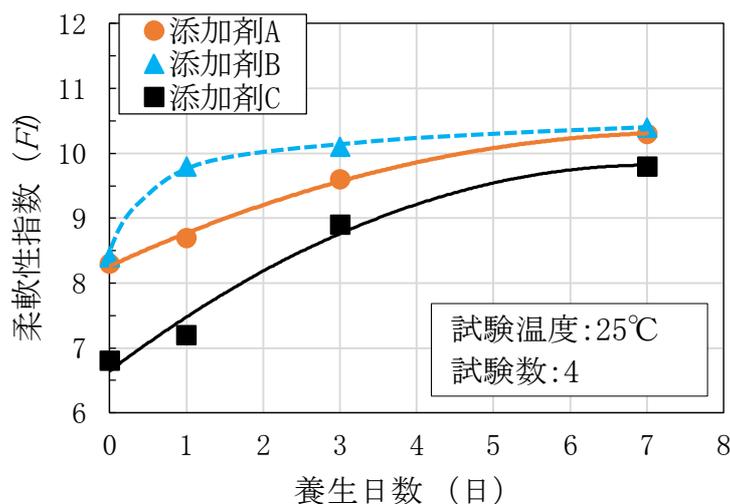


図-4-6 養生日数と FI の関係

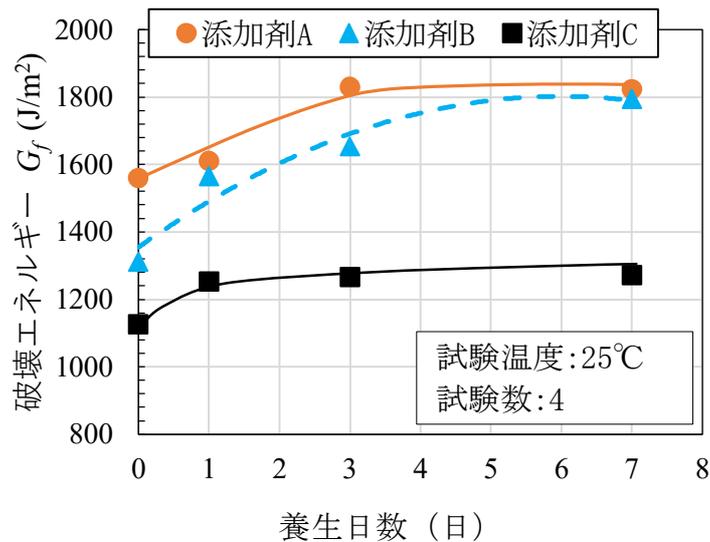


図-4-7 養生日数と G_f の関係

次に標準添加方式と事前添加方式によって製造した混合物の疲労抵抗性について比較した。2点曲げ疲労試験の結果を図-4-8に示す。

この結果、いずれの添加剤も事前添加方式の疲労破壊回数は標準添加方式と比較して50%程度増加した。添加剤の種類によって大きな差異は見られないが、僅かながら芳香族成分を多く含む添加剤Bが疲労抵抗性に優れている。

第3章において、再生骨材配合率が50%で再生骨材(改質II型)の針入度が20から14に低下すると、疲労抵抗性は10~15%低下(図-3-28)したが、事前添加方式を適用すると疲労破壊回数は約50%向上することから、いずれの添加剤も針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として非常に有効であると言える。

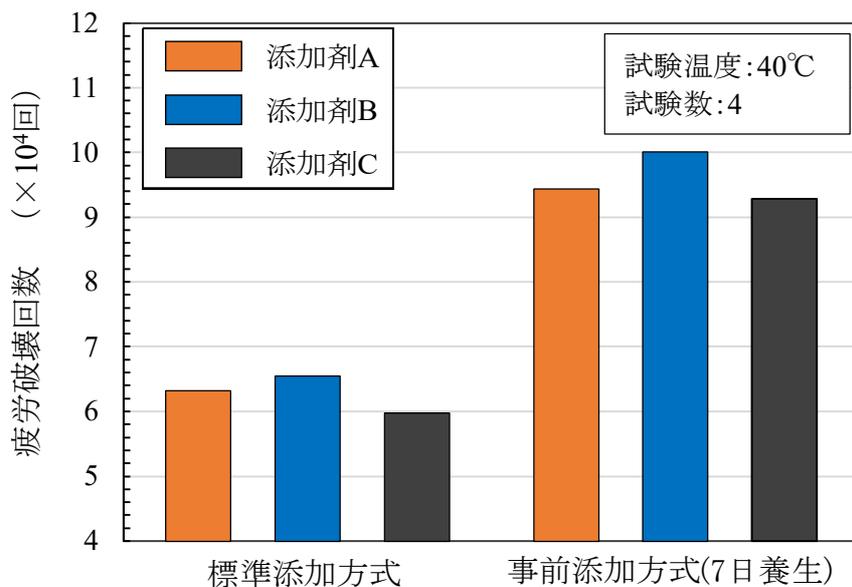


図-4-8 2点曲げ疲労試験による高温域(40°C)の疲労特性比較

低温域（10℃）の疲労抵抗性の評価である NAT-SCB 試験の結果を図-4-9 に示す。

事前添加方式の疲労破壊回数は標準添加方式と比較して増加する傾向があるが、添加剤の種類によって大きな差異があることが確認された。

添加剤 C は事前添加方式で製造しても疲労抵抗性の向上はほとんどないものの、添加剤 A と添加剤 B はいずれも事前添加方式にすることで約 3 倍向上することが確認された。また、添加剤 C と比較すると添加剤 B を使用して事前添加方式にすることで疲労抵抗性が約 7 倍に向上することが明らかとなった。

したがって、再生用添加剤は、ひび割れ抵抗性と疲労抵抗性の向上には、芳香族成分が多い添加剤が有効と考えられ、事前添加方式を組み合わせることで、さらに混合物性状が向上することが分かった。これらの知見は、針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として極めて有効であると言える。

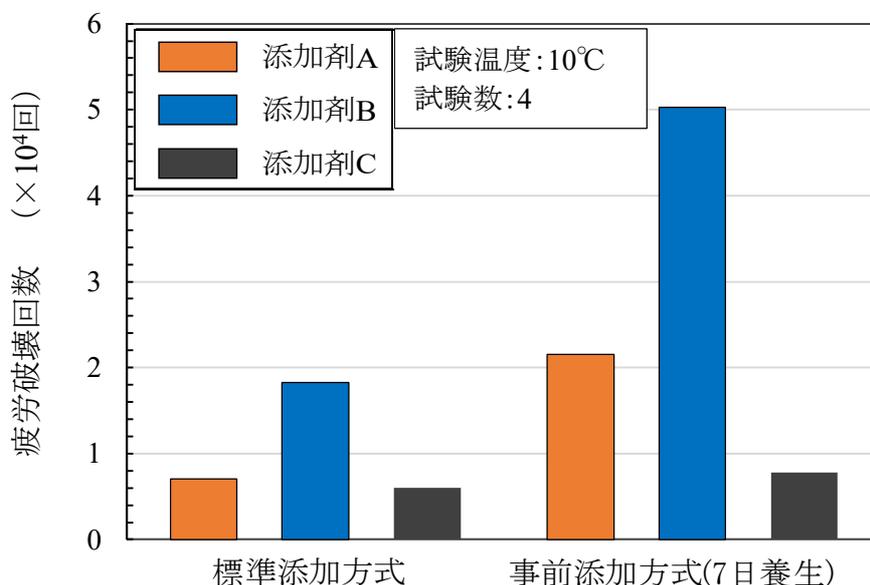


図-4-9 NAT-SCB 試験による低温域（10℃）の疲労特性比較

4.4 実機工場および実道における検証

4.4.1 検証概要

室内の結果から、常温の再生骨材に再生用添加剤を事前に散布しておく方法により、再生混合物の疲労抵抗性が向上したことから、実機プラントで製造した再生混合物の力学性状を確認するとともに、試験舗装を実施して施工性を確認した。

標準添加方式と事前添加方式の再生用添加剤の添加方法の違いを図-4-10に示す。

標準添加方式では再生骨材をドライヤで加熱した後に添加剤を加えて製造するのに対し、事前添加方式では、再生用添加剤を常温状態の再生骨材に散布して養生した後に加熱し、再生混合物を製造する。

混合物の製造は、株式会社 NIPPO の御殿場合材工場において、標準添加方式と事前添加方式(7日養生)の2種の方法で再生密粒度(13)アスファルト混合物を製造した。

再生骨材の性状は表-4-1に、各添加方式の詳細な添加方法や添加量は表-4-3と同じであり、このうち、再生用添加剤は表-4-2の中から、最も添加量が少ないことや平均的な性状を示したことから、添加剤 A を使用して混合物を製造した。

表-4-3に示した配合により実機工場で製造し、練り落した混合物で供試体を作製した。試験は、SCB試験(25℃)、2点繰り返し曲げ試験(40℃)、NAT-SCB試験(10℃)を実施し標準添加方式と事前添加方式を比較した。

再生混合物の試験舗装は図-4-11に示すとおり、芦ノ湖スカイラインにおいて施工した。試験舗装の概要を表-4-5に示す。

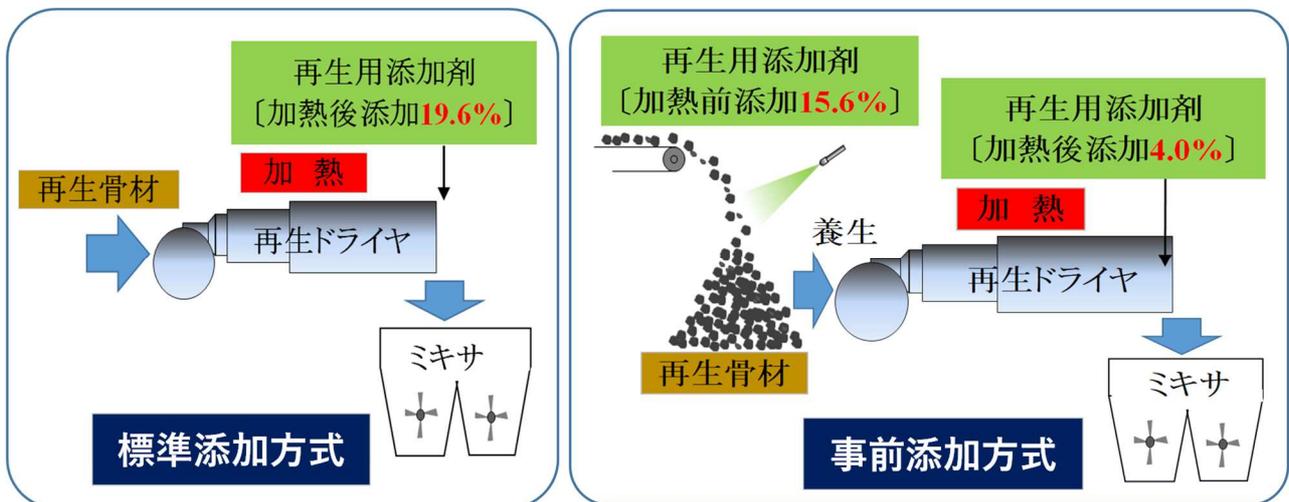


図-4-10 標準添加方式と事前添加方式



図-4-11 試験舗装の施工箇所

表-4-5 試験舗装の概要

項目		標準添加方式	事前添加方式
延長	(m)	40	40
幅員	(m)	3.6	3.6
舗装厚	(mm)	50	50
再生用添加剤量(%)	加熱前	—	15.6
	加熱後	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 (°C)	170		
初期転圧温度 (°C)	140		
二次転圧温度 (°C)	100		

4.4.2 混合物の力学特性試験結果

プラントにおいて、標準添加方式と事前添加方式で製造された再生混合物の SCB 試験 (25°C) の結果を 図-4-12 および 図-4-13 に示す。この結果、事前添加方式は、標準添加方式に比べて、 G_f は 20%、 FI は 30% 向上することが確認された。

次に 2 点繰り返し曲げ試験 (40°C) と NAT-SCB 試験 (10°C) から得られた破壊回数を 図-4-14 および 図-4-15 に示す。この結果、いずれの試験においても事前添加方式は、標準添加方式に比べて、疲労破壊回数は 40~50% 向上した。

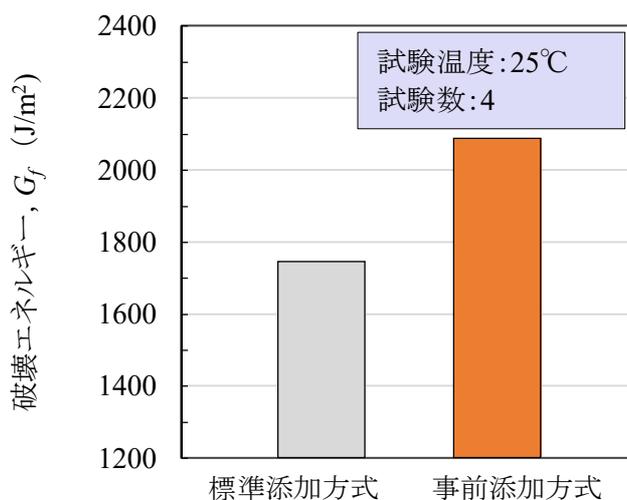


図-4-12 標準添加方式と事前添加方式の G_f

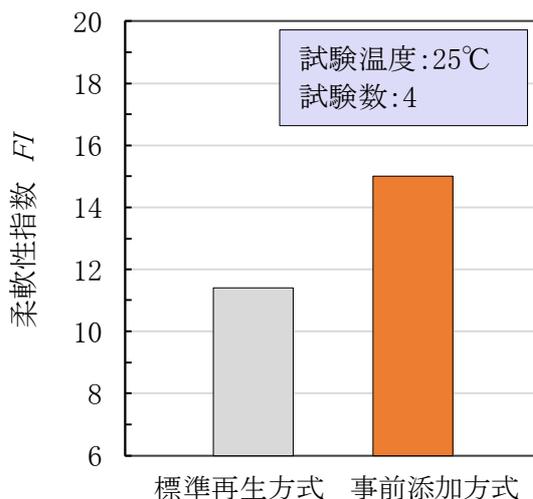


図-4-13 標準添加方式と事前添加方式の FI

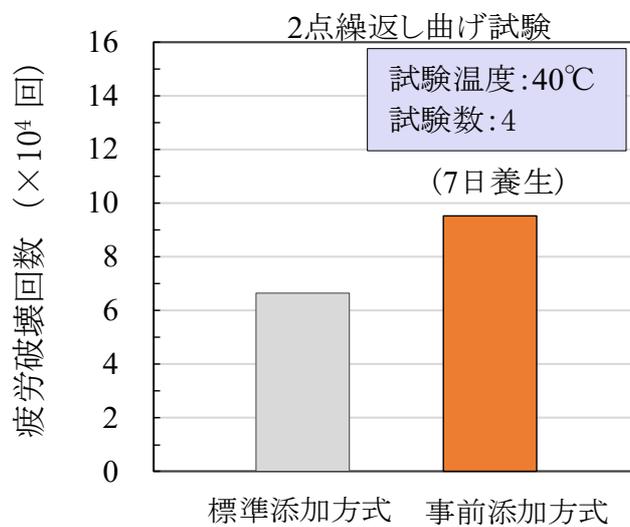


図-4-14 標準添加方式と事前添加方式の疲労破壊回数（2点繰返し曲げ試験）

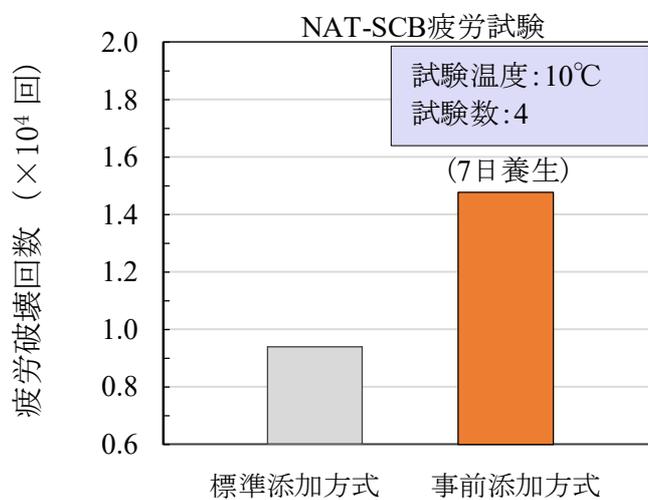


図-4-15 標準添加方式と事前添加方式の疲労破壊回数（NAT-SCB 疲労試験）

4.4.3 試験施工結果

標準添加方式と事前添加方式の再生骨材の状態および試験施工の舗装表面の状況は、写真-4-1に示すとおりである。

事前添加方式の再生骨材は、再生用添加剤の影響で標準添加方式よりも黒色に変色しているが、施工後の舗装表面はほぼ同等であった。施工性、転圧時の落ち着きに関しても、標準添加方式と事前添加方式に大きな差異は見られなかった。

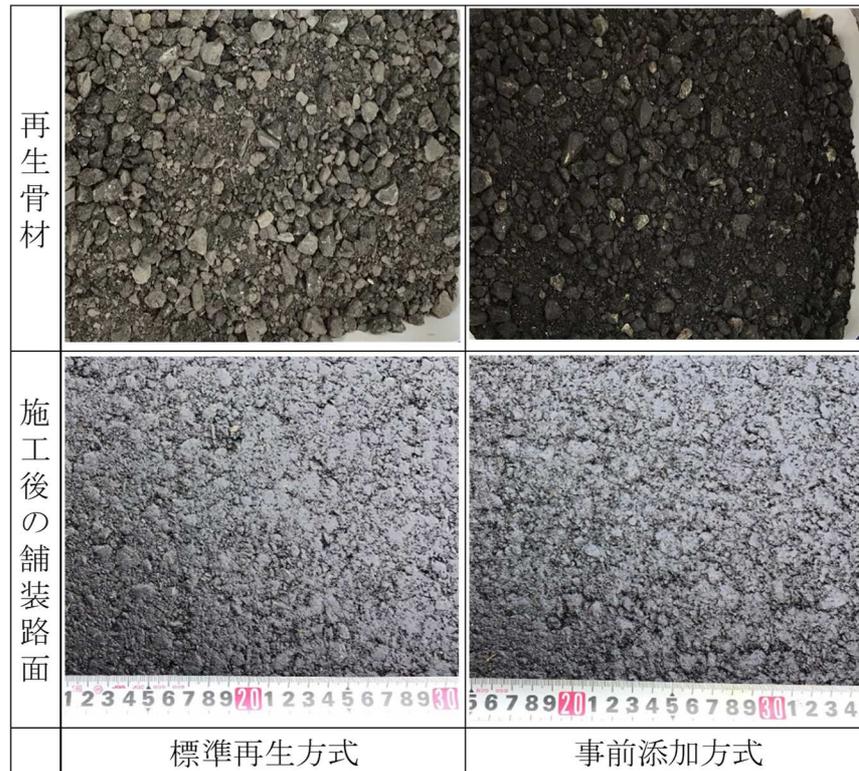


写真-4-1 再生骨材および試験舗装の表面



写真-4-2 試験舗装完了後の状況

試験舗装を施工した後に現場からコアを採取し、コアによる圧裂試験を行った結果を図-4-16に示す。

この結果、事前添加方式の圧裂試験による G_f は、プラントで製造された再生混合物の SCB 試験結果（図-4-12）と同じように、標準添加方式よりも約 20% 大きいことを確認した。

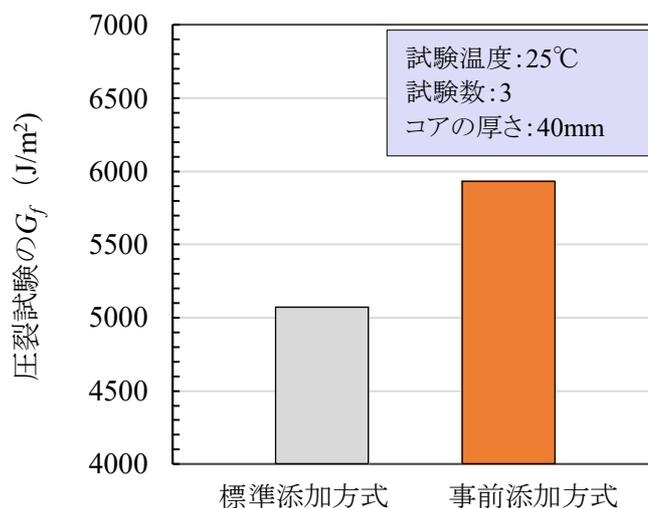


図-4-16 現場抜き取りコアの圧裂試験から求めた G_f

試験舗装箇所の追跡調査結果は、表-4-6に示すとおりであり、施工から9か月を経過した時点では、平たん性、わだち掘れ量、ひび割れ率に関しては大きな差異は見られず、いずれの添加方式も良好な供用性を確保している。

表-4-6 試験舗装の追跡調査結果

調査項目	単位	工区	施工直後 2020.12.14	供用9か月 2021.8.3
平たん性	(mm)	標準添加方式	1.69	1.65
		事前添加方式	1.36	1.69
わだち掘れ量	(mm)	標準添加方式	0	2.7
		事前添加方式	0	2.6
ひび割れ率	(%)	標準添加方式	0	0
		事前添加方式	0	0

4.5 結論

本章では、再生用添加剤の組成ついて着目し、再生用添加剤の種類を変えて混合物性状を比較した。

また、再生骨材に再生用添加剤が浸透する状態について着目し、再生用添加剤を添加した後の養生期間を変えて混合物性状を比較した。

さらに、実機プラントにおいて、製造した混合物の性状と、現場施工における作業性や舗設混合物の性状に関しても検証した。

第4章で得られた結論を以下に示す。

- 再生用添加剤の種類を変えて SCB 試験を実施した結果は、芳香族成分が多い添加剤は、 FI と G_f が高い傾向がある。
したがって、芳香族成分が多い添加剤は、ひび割れ抵抗性の向上に有効であると考えられる。しかし、添加量や粘性の影響もあると考えられ、この点は今後の検証課題である。
- 2点繰り返し曲げ試験(40°C)、NAT-SCB 試験(10°C)の結果からは、高温域の疲労抵抗性は添加剤種の影響は少ないものの、低温域では添加剤の種類によって大きな差異があり、芳香族成分の多い添加剤は、少ない添加剤と比較すると疲労抵抗性が3倍程度も優れることがわかった。
- 再生用添加剤の浸透性を高めるために、常温状態の再生骨材に再生用添加剤を散布し、一定期間養生した後に加熱して再生混合物を製造する事前添加方式を考案した。この方法により、常温域におけるひび割れ抵抗性 (FI と G_f) が 20~30%程度向上することを確認した。また、高温域と低温域における疲労抵抗性は 40~50%向上することを明らかにした。
- ひび割れ抵抗性の向上傾向は、20°Cの条件では、養生期間が3日以上経過すると少なくなることから、養生期間は3日以上を必要とすることが分かった。
- 芳香族成分が多い再生用添加剤は、事前添加方式の養生時間の経過に伴い FI および G_f の増加傾向が大きいですが、芳香族成分の少ない添加剤は養生日数が経過しても G_f に関しては大きな向上は期待できないことが分かった。
- 事前添加方式で製造した再生混合物の高温域 (40°C) の疲労抵抗性は、添加剤の種類によって大きな差異は見られず、いずれの添加剤も事前添加方式によって混合物を製造することで疲労破壊回数が 50%程度増加した。
事前添加方式は、いずれの添加剤でも効果を示すことから、針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として非常に有効であると言える。
- 事前添加方式で製造した混合物の低温域 (10°C) の疲労抵抗性は、添加剤の種類によって大きな差異があることが確認され、芳香族成分が多いものが事前添加方式による疲労抵抗性の向上効果が高いことが分かった。

芳香族分が少ないものは事前添加方式で製造しても疲労抵抗性が変わらないものの、芳香族成分が70%程度含む添加剤は事前添加方式によって、低温域の疲労抵抗性を3倍程度向上させる効果があることが分かった。

したがって、再生用添加剤は、ひび割れ抵抗性と疲労抵抗性の向上には、芳香族成分が多い添加剤が有効と考えられ、事前添加方式を組み合わせることで、さらに混合物性状が向上することが分かった。これらの知見は、針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として非常に有効であると言える。

- 実機工場から採取した再生骨材を用いて、室内で事前添加方式によって製造した再生混合物は、従来の標準添加方式と比べ、常温域におけるひび割れ抵抗性が20%程度、高温域と低温域における疲労抵抗性は40～50%向上することを明らかにした。
- さらに、試験舗装を実施した施工状況からは、施工性や舗装表面の仕上がりは標準添加方式と同等であった。しかし、混合物性状は標準添加方式と比較すると、ひび割れ抵抗性は20～30%、疲労破壊回数は40～50%向上することを確認した。第3章において、再生骨材配合率が50%（改質II型再生骨材）の針入度が20から14に低下すると、 G_f は20～30%低下（-3-18）、疲労抵抗性は20～50%低下（, ）するのに対して、事前添加方式を適用すると上記のとおり向上することから、針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として非常に有効であることが分かった。

【第4章の参考文献】

- [1]公益社団法人日本道路協会 舗装調査・試験法便覧(G029),pp.336-349
- [2]木谷貴宏,梅本勲史,東本崇:再生用添加剤の浸透性に関する検討,舗装,pp.8-11,2021.2
- [3]安藤政浩, 亀山修一, 向後憲一:フォームドアスファルト技術と添加剤を併用した再生中温化アスファルト混合物に関する研究,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), pp.261-267,2020.
- [4]公益社団法人日本道路協会:舗装再生便覧(平成22年版),pp.14,2010.
- [5]鈴木義昭,田辺知子:再生用添加剤の再生能力と耐久性について,道路建設,pp59-65,1990.5
- [6]公益社団法人日本道路協会:舗装調査・試験法便覧(A043),pp.164-172,2019
- [7]本山正樹,中村健:再生用添加剤を用いた劣化アスファルトの再生方法に関する研究,土木学会第71回年次学術講演会,pp.47-48,V-024,2016.9
- [8]西崎致,佐々木巖:劣化アスファルト舗装の再生利用に関する研究(2),循環型社会形成のためのリサイクル建設技術の開発,プロジェクト研究・重点研究,研究成果報告書,2009年,土木研究所ホームページ
- [9]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て再生された混合物とアスファルトの性状に与える影響,土木学会論文集 E1(舗装工学),Vol.71,No.3,pp.73-78,2015
- [10]加納孝志,新田弘之,佐々木巖,川上篤史:飽和成分の多い再生用添加剤で繰り返して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,pp.65-71,2015
- [11]加納陽輔,赤津憲吾,秋葉正一,川上篤史,新田弘之:再生用添加剤の性質が繰り返して再生された再生混合物と再生アスファルトの性状に与える影響,舗装,pp.28-33,2017.3
- [12]川上篤史,田湯文将,新田弘之,五十嵐隆次,藪雅行:再生骨材配合率が高いアスファルト混合物の繰り返し再生の性状変化,第33回日本道路会議,3016,2019.11
- [13]新田弘之,田湯文将,川嶋陽子,川上篤史:繰り返して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,pp.59-67,2019
- [14]田湯文将,新田弘之,川上篤史,川嶋陽子:アスファルト混合物の疲労抵抗性に関する評価方法の検討,第33回日本道路会議,3055,2019.11

第 5 章
再生アスファルト混合物の締固め特性
と作業性の向上

第5章 再生アスファルト混合物の締固め特性と作業性の向上に関する研究

5.1 緒言

アスファルト混合物の品質は、一般的に設計図書に記される試験項目の規格値を満足する事で確保されると考えられ、具体的にはマーシャル安定度、フロー値、残留安定度、動的安定度などについて規格値が定められている[1].

一方、アスファルト混合物は、熱可塑性樹脂であるアスファルトを使用することから、骨材とアスファルトを混合する際の温度や締め固めを行う際の温度が、混合物の品質を確保する観点から定められている [2].

この温度よりも低い場合は、アスファルトの粘性が高くなることから、混合性や作業性および締固め特性が低下するが、これらの性能が低下した場合は、混合ムラの発生や、アスファルトフィニッシュ敷き均し時に混合物の団粒化に伴う引きずりが発生するほか、表面の肌理が粗くなり水密性の低下が懸念される。また、アスファルトの粘性の増加は、締固め特性が低減し、必要な密度が得られないことに起因する強度低下から舗装耐久性が低下するおそれがある。

したがって、アスファルト舗装の品質を確保する上で、アスファルトの粘性を管理することが重要であり、これまでは、混合物性状時や施工時の温度を管理することで品質を確保してきた。

しかし、再生混合物では、再生骨材のアスファルトが劣化している場合や改質アスファルトの成分が含まれる場合は、再生骨材中のアスファルトの粘性が増加する。

このため、再生用添加剤を添加することによってアスファルトの粘性を回復する方法を行っている。しかしながら、針入度の試験温度である 25℃では粘度は回復するものの、高温域の粘性は改善しきれず、この結果、施工性や締固め易さが悪化する。

アスファルトの粘性が増加した場合、一般的な対策としては、温度を高めて粘性を低下させる方法が取られるが、アスファルトの劣化は加熱温度が高いほど大きくなるため、舗装施工便覧[2]では、アスファルト混合物の加熱温度の上限を 185℃としており、制約を設けている。この様にアスファルトの劣化を抑制したり、温室効果ガスの排出量抑制の観点では、加熱温度は最小減にすべきである。

温度を高めずにアスファルト混合物の施工性や締固め特性を改善する方法としては、**図-5-1** に示す中温化技術が一般的であり、アスファルトに中温化剤を添加する方法とフォームドアスファルト技術（以下、フォームド As）がある[3][4].

これらの技術を使用して、製造温度を低減したアスファルト混合物を中温化アスファルト混合物（以下、中温化混合物）と呼び、標準温度で製造した場合は、施工性改善型の混合物として寒冷期施工などで品質確保の方法として活用されている。

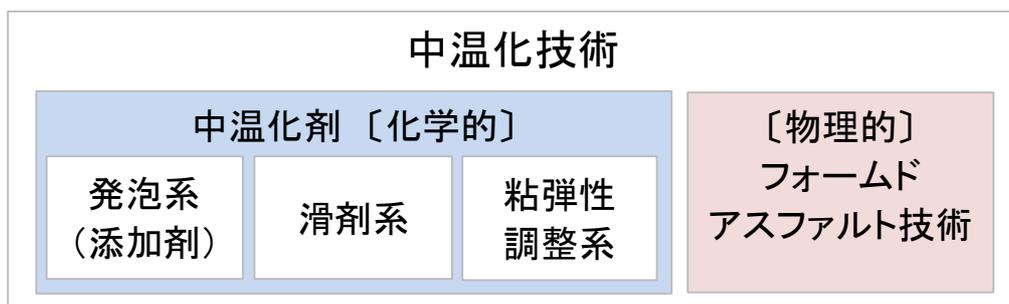


図-5-1 中温化技術の概要

中温化剤は、1990年代後半から開発が進められ[5]，発泡系，滑剤系，粘弾性調整系の種類に分類され，いずれの中温化剤も混合物の種類に関わらず活用できるメリットがある[6][7][8][9][10][11][12][13]．中温化混合物は2010年2月に「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」（グリーン購入法）に基づく特定調達品目に指定されている．しかしながら，同年における加熱アスファルト混合物（以下，混合物）全体に占める中温化混合物の割合は0.3%(2010年)に過ぎず[5]，広く普及しているとは言えない．その理由の1つとしては，中温化剤の材料費と投入費用などによる製造コストの増加が考えられ，中温化剤の普及には経済性の改善が必要とされている．

一方で，中温化剤は，寒冷期施工の施工性改善を目的に活用する研究も行われており[14][15][16]，寒冷期や運搬時間が長いなどの施工条件において，温度が低下した際に締め固め特性を改善する方法として，通常温度で製造された中温化剤入り混合物が既に実用的に活用されている．

次にフォームドAsは，欧米で普及している技術[17][18][19][20][21]であり，特に米国では，アスファルト混合物製造量のうち3割程度が中温化混合物（WMA:Warm Mix Asphalt），そのうち，約8割がフォームドAsを使用して製造されている[22]．

わが国のフォームドAsによる加熱アスファルト混合物の製造技術は，昭和53年発行のアスファルト舗装要綱[23]に記載されていることから，既に40年以上前から利用されている．しかしながら，当初は混合性や施工性の改善を目的としたものであり[24]，中温化を目的に活用されたのは近年である．

フォームドAsが普及している理由は，使用材料が水のため経済性に優れる点であり，機械整備のためにイニシャルコストが必要なものの，ある程度の製造量が見込めると中温化剤と比較してコスト的に有利となる．

しかしながら，新規アスファルトに適用する技術であるため，再生混合物に適用する場合は，再生骨材配合率が増加すると効果が低下する点が課題である．この様にフォームドAs技術には，利点と欠点があると言える．

このため，近年では再生混合物にも適用が可能なフォームドAsが研究され，添加水に高い圧力をかけて発泡倍率を高めるフォームド装置の改良技術[25][26][27]や，発泡助剤とフォームドAs技術を併用する方法が考案され[28][29][30]ており，後者の技術では，再生骨材配合率50%で30℃製造温度を低減する中温化が可能になっている．

再生混合物は，前章で検証した事前添加方式による製造方法や再生効果に優れた再生用添加剤を適用することで混合物の耐久性は大きく改善されるものの，施工時の締め固め特性や作業性が改善されるものではない．再生骨材内部の劣化アスファルトまで均一に混合されることを勘案すると，施工時の締め固め特性や作業性は，従来の製造方法

よりも逆に悪化する可能性が考えられる。

このため、本章では、粘性が高い再生混合物であっても適切な施工を可能とするため、再生混合物の締固め特性や作業性の改善方法について研究する。

さらに温室効果ガスの発生抑制を目的として、高い再生骨材配合率の再生混合物について製造温度を 30℃低減できる安価な中温化技術の開発を目標とする。

具体的には、再生骨材配合率が 50%以上の再生混合物に関して、製造温度を 30℃低減しても、標準的な混合物と同等の締固め度と作業性を確保する技術を開発する。

しかし、中温化剤では経済性に課題があり、フォームド As には、再生混合物に適用する場合に再生骨材配合率が増加すると効果が低下する課題があるため、本研究では、中温化効果のある添加剤とフォームド As を併用することで、経済性と再生混合物の品質向上を両立する研究を行う。また、本研究で使用したフォームド装置はアスファルト配管中に常圧で水を添加する汎用的な装置であり、発泡性を補助する添加剤および締固め特性を改善する添加剤との併用した点が、本技術の特徴となる点である。

5.2 フォームド As の適用効果

フォームド As は一般に新規アスファルトを吐出する際に活用する技術であるため、再生混合物にフォームド As を適用する場合は、再生骨材の配合率が増加すると、新規アスファルトの吐出量が少なくなりフォームド As の効果が低下すると考えられる。

このため、本研究では、まず、再生骨材の配合率とフォームド As の締固め改善効果の関係を確認するために、再生骨材配合率を変化させてマーシャル供試体の締固め特性について検討した。

5.2.1 材料性状・配合およびフォームド As の製造方法

配合は表-5-1 に示す性状の再生骨材を使用し、密粒度アスファルト混合物(13)に関して、再生骨材配合率を 40%、60%、80%と変化させた。目標針入度は、表-5-2 に示す再生用添加剤と表-5-3 のストレートアスファルト 80/100 を使用して 70 に調整した。

フォームド As は Wirtgen 社の室内試験装置にて製造し、フォームド As 製造時の添加水量は、既往の研究[31]から発泡倍率の観点で効果的と判断される新規アスファルト量の 2%とした。また、マーシャル供試体作製時の混合および締固め温度は表-5-4 に示す温度とした。なお、混合物の配合および粒度は表-5-5 に示すとおりである。

表-5-1 再生骨材の性状

種類		性状値
通過質量百分率 (%)	13.2	100.0
	4.75	70.3
	2.36	53.8
	0.6	29.3
	0.3	21.4
	0.15	13.3
	0.075	7.3
アスファルト量 (%)		5.26
針入度 (1/10mm)		20
軟化点 (°C)		66.8

表-5-2 再生用添加剤の性状

試験項目	単位	試験値
粘度 (psi)	(1/10mm)	82.71
引火点	(°C)	260
薄膜加熱質量変化率	(%)	-1.37
薄膜加熱後の針入度残留率	(%)	1.05
飽和分	(%)	82.9
芳香族分	(%)	13.1
レジン分	(%)	3.3
アスファルテン	(%)	0.0

表-5-3 新規アスファルトの性状

試験項目	単位	試験値
針入度 (25°C)	(1/10mm)	90
軟化点	(°C)	44.0
伸 度(15°C)	(cm)	100(+)
引火点	(°C)	358
薄膜加熱質量変化率	(%)	0.11
薄膜加熱後の針入度残留率	(%)	67.0
タフネス (25°C)	(N・m)	4.3
テナシティ (25°C)	(N・m)	1.0
密 度 (15°C)	(g/cm ³)	1.035



写真-5-1 Wirtgen 社製フォームド As 発生装置

表-5-4 混合物の混合温度および締固め温度

混合物種	混合温度	締固め温度
標準再生混合物 (フォームAsを使用しない)	160℃ (最適混合温度)	140℃ (最適締固め温度)
	130℃	110℃
フォームAs再生混合物	130℃	110℃

表-5-5 アスファルト混合物の配合および粒度

種 類		再生密粒度混合物(13)		
再生骨材配合率		40%	60%	80%
配 合 (%)	再生骨材	40.0	60.0	80.0
	6号砕石	23.0	17.0	11.2
	7号砕石	13.0	10.6	7.3
	スクリーニングス	8.0	3.8	1.5
	粗砂	13.8	7.5	0.0
	石粉	2.2	1.1	0.0
	最適アスファルト量	5.7	5.6	5.5
	新アスファルト	3.6	2.4	1.1
	旧アスファルト	2.0	2.9	3.9
	再生用添加剤	0.1	0.3	0.5
通 過 質 量 百 分 率 (%)	19mm	100.0	100.0	100.0
	13.2	95.9	96.1	96.4
	4.75	65.3	65.1	65.0
	2.36	45.2	45.0	45.1
	0.6	23.3	23.5	24.2
	0.3	16.2	16.7	17.6
	0.15	10.0	10.3	10.9
	0.075	6.0	6.0	6.0

5.2.2 フォームド As の締固め改善効果

本研究ではフォームド As の締固め効果を明確にするため、最適締固め温度よりも 30℃低減してマーシャル供試体を作製し、その際の締固め度を比較した。なお、締固め度は最適締固め温度で締め固めた標準再生混合物の密度を基準とした。再生骨材配合率を変えた各混合物の締固め度を図-5-2 に示す。

標準再生混合物は、締固め温度を 30℃低下させて締め固めると、最適温度で締め固めた場合と比較して、いずれの再生骨材配合率においても締固め度が 4%程度低下した。

これに対してフォームド As 再生混合物は、再生骨材配合率が 40%では、同温度(110℃)で締め固めた標準再生混合物と比較して締固め度が約 2%高く、フォームド As の締め固め改善効果が認められた。しかし、再生骨材配合率の増加に伴いフォームド As 混合物は締固め度が低下する傾向が顕著にみられ、再生骨材配合率が 80%では最適締固め温度の締固め度よりも 3%以上低くなった。

以上のことからフォームド As には締固め改善効果は見られるが、再生骨材配合率が増加するほどその効果は低下する。再生骨材配合率が 80%では締固め改善効果が低減することから、再生骨材配合率が高い混合物では締固め不足のおそれがあると考えられる。

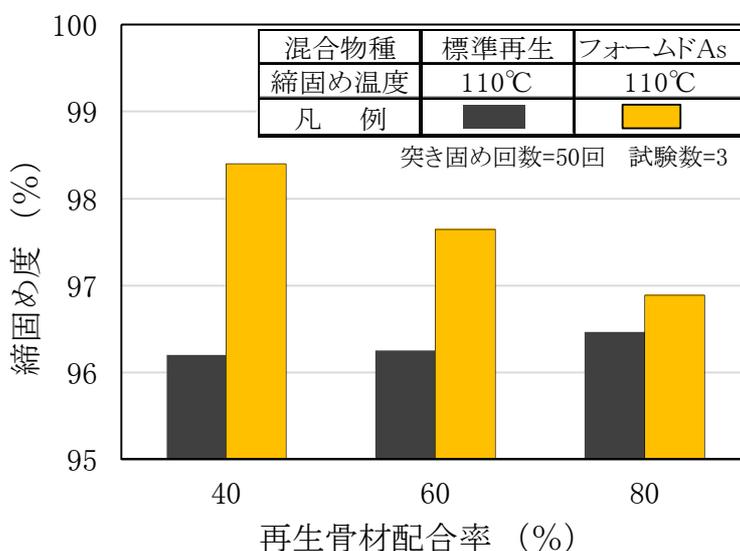


図-5-2 フォームド As の締固め改善効果

5.3 添加剤の適用効果

5.3.1 添加剤の選定

一般にアスファルト舗装は運搬→敷均し→転圧の工程があることから、アスファルト混合物を製造してから転圧が完了するまでの時間が、2時間程度要する場合もある。

したがって、フォームド As の効果は2時間程度必要となるが、泡は時間とともに消失するため、発泡状態の持続性を高める必要がある。発泡の持続性を高める方法としては、米国の MAXAM 社では、高圧水をアスファルトに吹き込むことで微細泡を製造し、持続性の高いフォームド As を製造する技術がある[19]。

しかし、高圧水を使用するフォームド As 装置は、非常に高価であることやアスファルト吐出量が少なくなる（再生骨材配合率が高い場合）と高圧に出来ないなどの課題がある。フォームド As の発泡倍率を高める方法は、ケミカルフォームドの研究[32]でも行われているが、これまで活用されてきた界面活性剤では、最大発泡倍率を高めることには有効であるが、消泡も早いとされ[29]、実用的には不適である。

したがって、従来と異なる種類の発泡補助剤について検討し、2時間後もフォームド As の発泡状態が持続し、締固め効果を継続することを目標とした。

フォームド As の発泡状態を観察するとアスファルトの温度が高温になるほど泡径が小さくなることから、アスファルトの粘度を低下させることで微細泡化することが可能と考えた。そこで、アスファルトを軟化させる添加剤を発泡補助剤として加えることで微細泡を製造する方法について検討した。しかし、多量に添加した場合は、混合物強度が低下する恐れがあるため混合物強度を低下させない程度の添加量にする必要がある。

発泡状態を改善する添加剤の他に、添加剤自体に締固め改善効果があるものについても検討を行った。温度低下した場合でも締固め度を確保する技術としては、粘弾性調整系の添加剤が使用されている。しかし、この添加剤も多量に添加した場合は、混合物強度が低下するおそれがあるため、本研究では、粘弾性調整系と滑剤系の両方の効果があると考えられる添加剤について検討した。

研究した添加剤は、いずれもアスファルトを軟質化させる特性を持つものであり、多量に添加すると混合物の強度特性を著しく低下させるため、フォームド As と併用することで、その添加量を低減して強度を確保するとともに経済性にも優れたフォームド As 技術を開発することを目標とした。

5.3.2 実験概要

検討は、最初に強制的に加熱劣化させた改質アスファルトを作製し、これに各添加剤を質量で5%（内割）添加して、アスファルト性状を比較した。アスファルト性状は、針入度、軟化点、伸度と組成分析試験を行い、アスファルトの軟質効果が高く、組成変化が少なく、経済性に優れた添加剤を選定することとした。

劣化前の改質アスファルトの性状は、表-5-6に示すとおりである。劣化方法は、試験法便覧「薄膜加熱試験方法」A046[33]で163℃の乾燥炉に8時間養生し、針入度が20未満になるように強制的に劣化させた。

表-5-6 改質アスファルトの性状

項 目	改質Ⅱ型
針入度 (25℃) (1/10mm)	49
軟化点 (℃)	62
密 度 (15℃) (g/cm ³)	1.035
タフネス (25℃) (N・m)	28.6
テナシティ (25℃) (N・m)	23.3

5.3.3 試験結果

試験結果は表-5-7 に示すとおりである。この結果，最も針入度や伸度の向上効果に優れ，アスファルトの組成への影響も少なく，経済性にも優れた添加剤は，添加剤 B であり，これを締固め改善剤として検討することとした。

また，フォームド As の発泡補助剤として使用する場合は，添加水に予め含ませておくことで製造の効率化を図れるため，水溶性の添加剤 D を発泡補助剤として検討することとした。なお，添加剤 B は植物由来の脂肪酸系化合物であり，添加剤 D は植物由来のグリコールエーテル系化合物である。

表-5-7 各添加剤のアスファルト性状改善効果

項 目	劣化改質 アスファルト	添加剤A	添加剤B	添加剤C	添加剤D	添加剤E	
針入度 (1/10mm)	14	45	46	42	43	37	
軟化点 (℃)	71	56.1	55.3	57.3	58.3	57	
伸 度 (cm)	1.3	34.2	37.6	27.3	32	9	
組成分析 (%)	飽和分	2.7	2.7	2.6	2.7	3.0	3.9
	芳香族分	47.8	49.8	48.0	46.9	48.1	41.4
	レジン	22.7	20.8	22.0	21.8	21.8	36.7
	アスファルテン	26.8	26.7	27.5	28.7	27.1	18.0
水溶性	—	×	×	×	○	×	
経済性	—	×	○	△	○	○	

5.3.4 発泡補助剤の検討

ここでは、添加剤 D をフォームド As 水に予め添加して新規アスファルトに添加することで、アスファルトの粘性低下とフォームド As の製造を同時にできると考えた。

検討は、製造に使用するフォームド As 水に発泡補助剤として添加剤 D の濃度を変えて添加し、従来から使用されていた界面活性剤と発泡状態を経時的に比較した。

発泡補助剤の基本性状は表-5-8 に示すとおりである。

なお、各添加剤を含んだ添加水量は、新規アスファルト質量に対して 2% とした。フォームド As は、前章で示したアスファルトを用いて Wirtgen 社の室内試験装置にて製造した。発泡倍率の測定方法は、20 リットルのアルミ製容器にフォームド As を噴出し、缶上端からの下がり測定することでアスファルトの容積を測定した。

アスファルトに水を添加した直後の最大発泡倍率を図-5-3 に示す。界面活性剤の発泡倍率が最も高く、次いで水単体となり、発泡補助剤の発泡倍率は低かった。しかしながら、水を添加してから 30 分後～120 分後の発泡倍率は、図-5-4 に示すように、時間経過にともなって低下する傾向が見られるが、発泡補助剤 (25% 水溶液) の発泡倍率は界面活性剤や水単体よりも高くなり、2 時間後では約 2 割高くなった。発泡の持続性が向上した理由は、発泡補助剤を添加することで、写真-5-2 の様に泡の粒径が小さく多数発生するためと考えられる。発泡補助剤の添加に伴って最大発泡倍率は低下するため、ここでは 25% 水溶液の方が 50% 水溶液よりも発泡倍率の持続性に優れる結果となったと考えられる。

表-5-8 発泡補助剤の性状

項目	発泡補助剤
比重 (相対密度)	1.02
融点 (流動点)	-48℃
粘度 (mm ² /s)	25 (20℃)
溶解性 (水)	可溶
外観	褐色

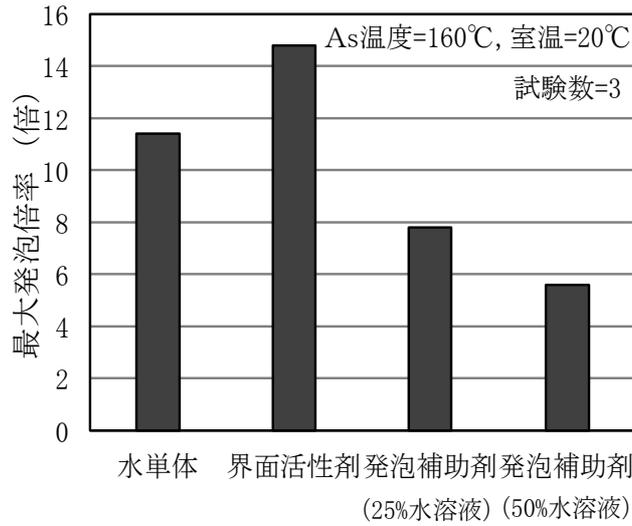


図-5-3 フォームド As の最大発泡倍率

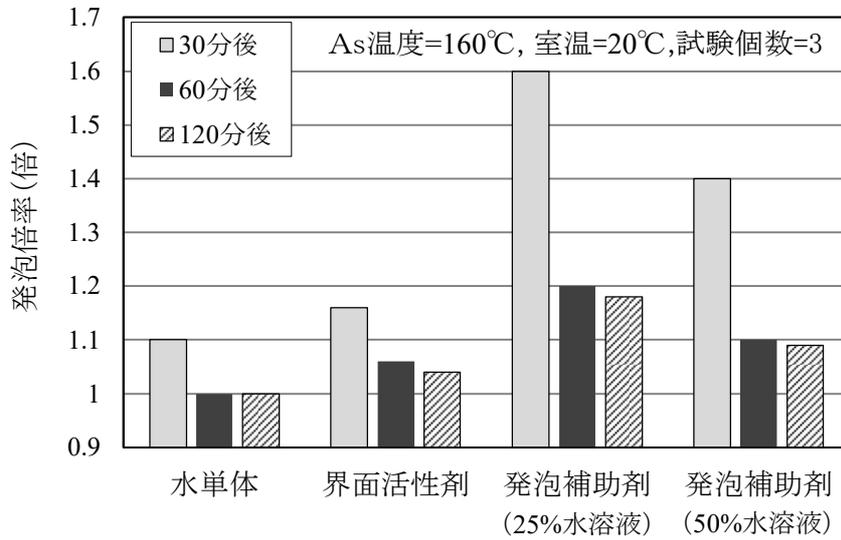


図-5-4 経過時間と発泡倍率

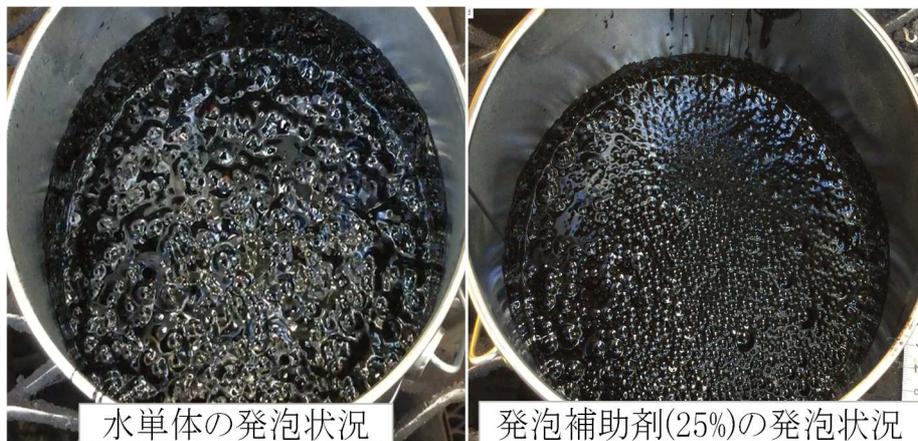


写真-5-2 発泡直後の発泡状態

5.3.5 締固め改善剤の検討

再生骨材の配合率が高い場合、発泡補助剤だけでは十分な締固め特性が得られない場合があることを想定し、ここでは締固め改善剤の適用を検討した。ここで検討した締固め改善剤は前章で検討した添加剤 B であり、その性状は表-5-9 に示すとおりである。

なお、この締固め改善剤は多量に添加するとアスファルトを軟質化させるため、ここでは旧アスファルトに対して 1% 添加することとし、混合物に直接添加する方法とした。また、フォームド As 水は新 As に対して 2% 添加し、発泡補助剤はフォームド As 水に対して内割 25% 添加した。

混合物は、「標準再生混合物」、「フォームド As (無添加)」、「フォームド As + 発泡補助剤」、「フォームド As + 発泡補助剤と締固め改善剤」について、前章と同じ材料を使用して再生骨材配合率を 40%、60%、80% と変化させた。

検討は、フォームド As の方法を変えて混合物を製造し、前章と同様に改善効果を明確にするため最適締固め温度よりも 30°C 低減してマーシャル供試体を作製し、各混合物の締固め度を比較した。

なお、締固め度は標準再生混合物 (締固め温度 140°C) の密度を基準として算出した。

試験結果は図-5-5 に示すとおりである。

標準再生混合物は締め固め温度が 30°C 低下 (110°C) すると締固め度が大きく低下するのに対して、水だけのフォームド As である「フォームド As」は締固め度が向上しており、フォームド As の効果が見られる。しかし、再生骨材配合率が増加すると締固め度が低下する傾向があり、再生骨材配合率が 80% ではほぼフォームド As の効果は認められない。

一方、「フォームド As + 発泡補助剤」は締固め度が増加し、「フォームド As + 発泡補助剤・締固め改善剤」は、さらに締固め度が増加することが分かる。

「フォームド As + 発泡補助剤 + 締固め改善剤」は、再生骨材配合率が 80% においても、99% 以上の締固め度を確保していることから、混合物温度が低下しても締固め度が確保でき、再生混合物の品質確保する方法として有効であることが分かった。

表-5-9 締固め改善剤の性状

項目	締固め改善剤
比重 (相対密度)	1.00
融点 (流動点)	10°C
粘度 (mm ² /s)	4.5 (40°C)
溶解性(水)	不溶
外観	淡黄色液体

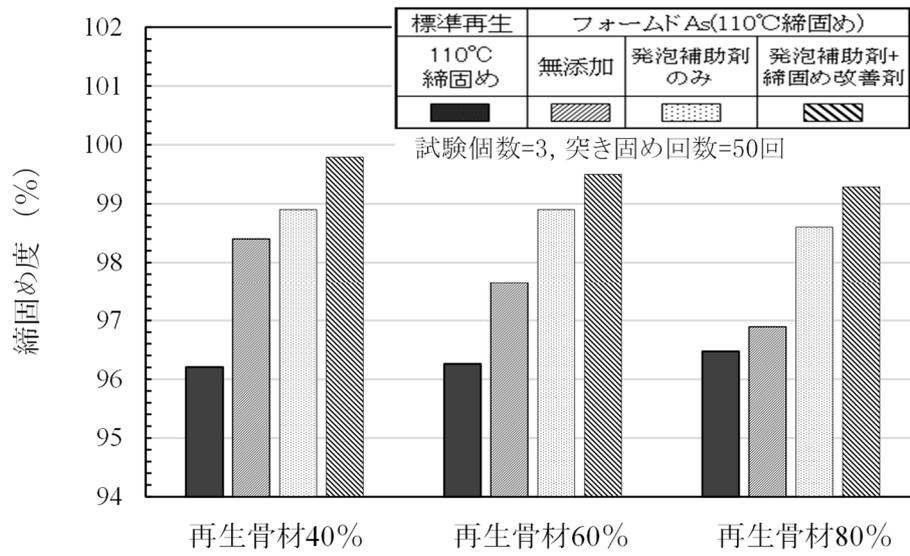


図-5-5 フォームド As の締固め度

5.4 実機工場における検証

前章において、フォームド As に発泡補助剤と締固め改善剤を添加することで、締固め度が向上したことから、実機工場において試験練りを行い、効果の検証を行った。なお、試験練りは栃木県にある塩谷合材工場において実施し、機構は 1.5 トン/バッチの併設加熱混合方式のアスファルトプラントである。

5.4.1 製造条件、配合

実機工場における再生混合物の製造条件を表-5-10 に示す。いずれの混合物も再生用添加剤とストレートアスファルト 80/100 を使用し、再生アスファルトの針入度は 70 を目標に調整した。アスファルト混合物は、密粒度アスファルト混合物(13)とし、表-5-11 に示す再生骨材を使用して再生骨材配合率は 60%とした。混合物の配合は表-5-12 に示すとおりである。

実機工場における添加剤の添加位置を図-5-6 に示す。発泡補助剤は、フォームド As に使用する水に 25%の濃度(質量)で予め加えておき、この水溶液を新アスファルトに対して 2%添加した。また、締固め改善剤はミキサーに直接投入した。

アスファルト舗装の施工は、一般的に製造から運搬時間を含めても 2 時間程度で舗設作業を完了する。

このため、時間経過によるフォームド As の消泡の影響を模擬的に確認する目的で練り落とし後は混合物を山積みにしておき、マーシャル、圧裂、ホイールトラッキング試験の供試体は、2 時間経過後に試料を採取して作製した。

なお、試験練り当日の気温は 28℃、混合物は 1 試料につき 1.5 トン練り落した。

表-5-10 添加剤種の添加量および締固め温度

項目	新規混合物	標準再生混合物	フォームド As再生混合物	
	無添加	無添加	発泡補助剤のみ	発泡補助剤+締固め改善剤
目標製造温度	155℃	155℃	125℃	
目標締固め温度	140℃	140℃	110℃	
再生用添加剤	-	対旧As10%		
発泡補助剤 (25%水溶液)	-	-	対新As 2%	対新As 2%
締固め改善剤	-	-	-	対旧As 1%

表-5-11 再生骨材の性状

種類		性状値
通過質量百分率 (%)	13.2mm	100.0
	4.75	64.1
	2.36	48.8
	0.6	27.4
	0.3	20.4
	0.15	12.7
	0.075	6.3
アスファルト量 (%)		4.91
針入度 (1/10mm)		23
軟化点 (°C)		65.8

表-5-12 再生混合物の配合および合成粒度

項目	種類	新規混合物	標準再生混合物	フォームド As 混合物
骨材配合 (%)	再生骨材	0.0	60.0	60.0
	6号砕石	36.0	13.2	13.2
	7号砕石	17.0	11.0	11.0
	スクリーニングス	18.0	3.8	3.8
	粗砂	25.0	10.3	10.3
	石粉	4.0	1.7	1.7
アスファルト量 (%)	最適アスファルト量	5.8	5.6	5.6
	新アスファルト	5.8	2.4	2.4
	旧アスファルト	0.0	2.9	2.9

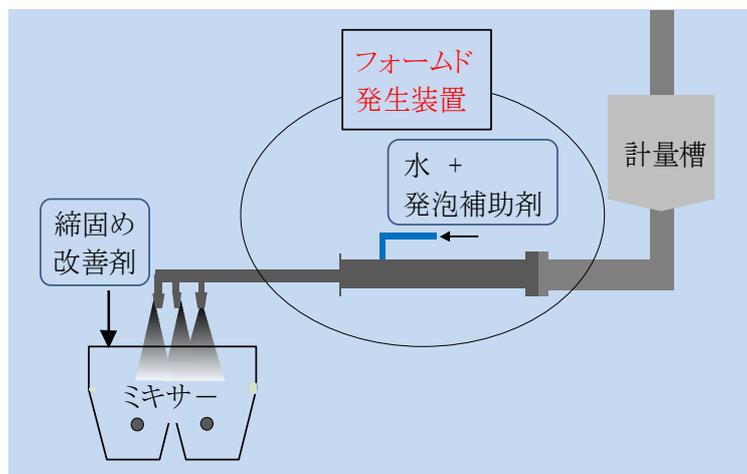


図-5-6 各添加剤の添加位置

5.4.2 混合物の力学性状

製造された混合物の性状を表-5-13に示す。「フォームド As +発泡補助剤」は、締固め温度が約 30℃低下しても、標準再生混合物の 99.2%の締固め度が得られた。「フォームド As +発泡補助剤+締固め改善剤」を用いた混合物の締固め度は 99.7%となり、さらに高い値が得られることが確認された。

また、「フォームド As +発泡補助剤」および「フォームド As +発泡補助剤+締固め改善剤」の再生混合物は、マーシャル安定度、圧裂強度、動的安定度ともに、標準再生混合物より若干低い値を示しているが、舗装施工便覧に示されているマーシャル安定度の基準値（4.9kN 以上）や再生舗装便覧に示されている設計圧裂係数の推奨値（0.60～0.90Mpa/mm）を満足していることが明らかとなった。

また、新規混合物と比較すると、同等かそれ以上の力学性状が得られており、このことから、添加剤やフォームド As が混合物の力学性状に悪影響を及ぼす可能性は少ないと言える。

この様な結果が得られた理由としては、添加剤を併用したフォームド As 混合物は、標準より 30℃低い締固め温度においても十分な締固めが得られたことが、力学性状の確保に影響したものと考えられる。

表-5-13 FA 混合物の性状

試験項目	新規混合物	標準再生混合物	フォームド As 混合物	
			発泡補助剤	発泡補助剤+締固め改善剤
再生骨材配合率 (%)	0	60	60	60
製造温度 (°C)	155	157	125	126
締固め温度 (°C)	140	140	110	110
密度 (g/cm ³)	2.371	2.380	2.361	2.373
締固め度※ ¹ (%)	100.0	100.0	99.2	99.7
マーシャル安定度 (kN)	10.1	11.4	10.4	9.6
圧裂強度(20°C) (Mpa)	1.54	1.81	1.68	1.53
圧裂係数(20°C) (Mpa/mm)	0.72	0.88	0.83	0.84
動的安定度 (回/mm)	490	720	680	560

※1. 締固め度は標準再生混合物を140℃で締固め密度を基準として算出

5.4.3 スティフネス

前章においてフォームドAs再生混合物の力学特性は、強度特性の低下が見られ、これらの数値は耐久性の観点では問題がない範囲であったが、低下の要因を把握するため、混合物のスティフネスを確認した。

アスファルト混合物のスティフネスは、弾性理論による順解析の主要な材料パラメータであるが、バインダの性状や再生用添加剤の被覆状態により、その値は変化すると考えられる。

試験は写真-5-3に示すNottingham Asphalt Tester (NAT)[34][35]を使用してIndirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)試験方法に基づき、BS EN12697に準拠して実施した。

この試験法は、円柱試験体を用いた繰返し間接引張試験にて変形係数を測定するものであり、ここではマーシャル供試体を使用した。試験条件は、①試験温度：5、10、20℃の3水準、②荷重載荷モード：ハーバーサイン波、③荷重載荷時間：124ms、④最大横方向変位：5 μ mとした。なお、スティフネスの算出に用いるポアソン比はいずれの温度条件においても0.35と仮定した。

試験温度20℃における各混合物のスティフネスを比較すると、図-5-7に示すとおりである。再生骨材配合率とスティフネスの関係は大きな差異は認められないが、「フォームドAs+発泡補助剤+締固め改善剤」は「標準再生混合物」と比較して若干低い傾向が認められ、これらの傾向は前述の圧裂係数などの傾向と一致している。

次に試験温度別の再生骨材配合率とスティフネスの関係は図-5-8のとおりである。「標準再生混合物」はいずれの温度条件（5℃、10℃、20℃）においても再生骨材配合率の増加によるスティフネスの変化は少ないものの、「フォームドAs+発泡補助剤+締固め改善剤」は再生骨材配合率の増加に伴いスティフネスが低下する傾向があり、その傾向は試験温度が低いほど顕著となっている。

以上の結果から、マーシャル安定度や圧裂強度、動的安定度の低下は、再生混合物のスティフネスが低いことが要因と考えられる。



写真-5-3 Nottingham Asphalt Tester

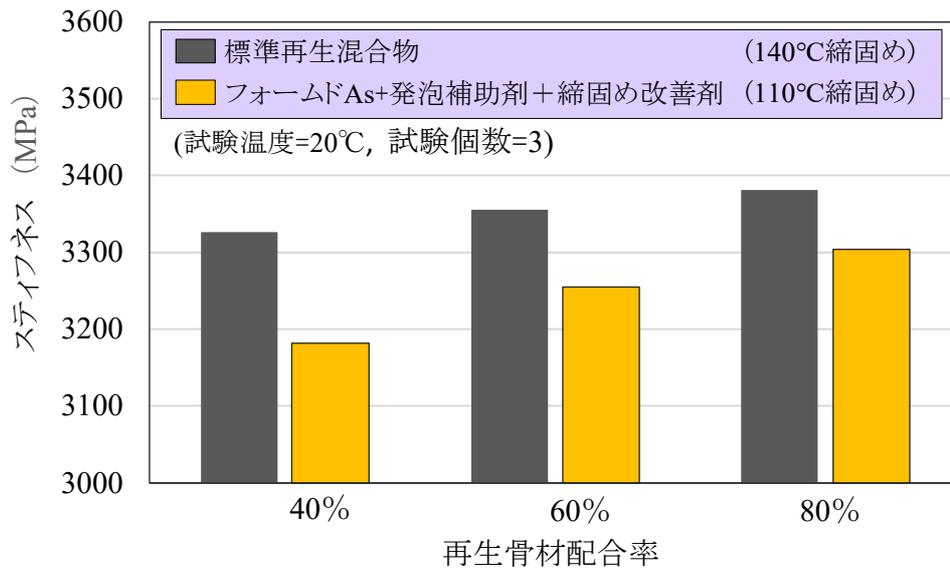


図-5-7 再生骨材配合率とスティフネスの関係

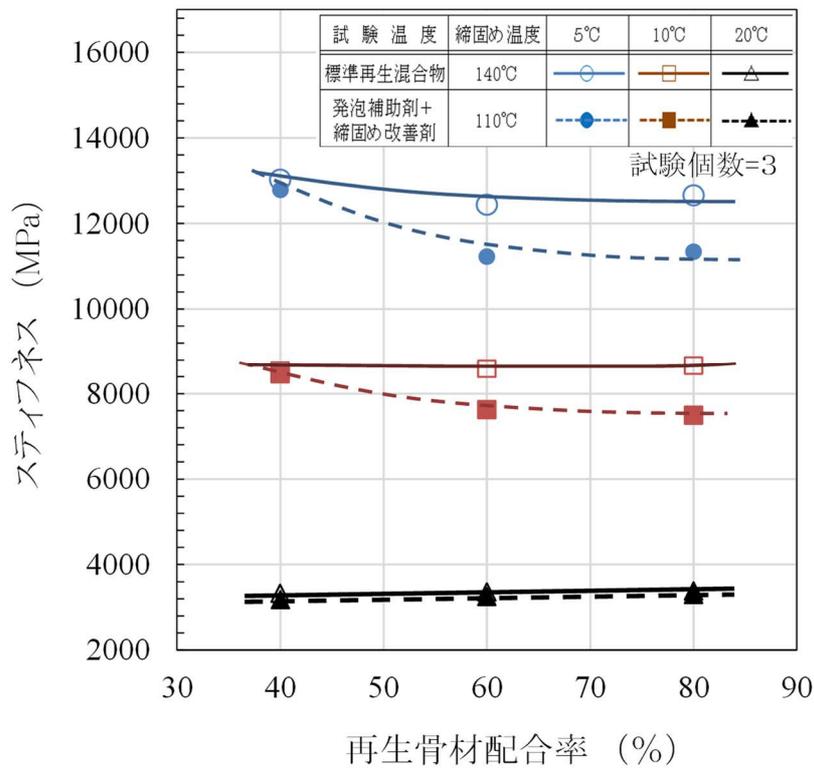


図-5-8 再生骨材配合率とスティフネスの関係 (試験温度別)

5.4.4 フォームド As 混合物のひび割れ抵抗性と疲労抵抗性

前章の試験結果において、フォームド As 混合物は、スティフネスの低下が見られたことから、第 3 章の評価試験方法を用いて、再生混合物のひび割れ抵抗性と疲労抵抗性を確認した。

なお、フォームド As の効果を様々な工場で検証するため、ここでは、前章とは別の実機工場（筑波工場）で製造し、混合物の性状を確認した。

また、前章の工場検証では再生骨材配合率が 60%であったが、さらに配合率を高めて、70%について検証を行った。

使用したアスファルトの性状を表-5-14 に、再生用添加剤の性状を表-5-15 に、再生骨材の性状は表-5-16 に示すとおりである。また、製造温度と混合物の配合は、表-5-17 のとおりであり、再生アスファルトの針入度は 50 に調整した。

表-5-14 アスファルト性状

項 目	ストアス 60/80
針入度 (25°C) (1/10mm)	70
軟化点 (°C)	46
密 度 (15°C) (g/cm ³)	1.037

表-5-15 再生用添加剤の性状

項 目	性状値	項 目	性状値
動粘度 (60°C) (mm ² /s)	82.71	飽和分 (mass%)	83.2
引火点 (°C)	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°C) (g/cm ³)	0.925		

表-5-16 再生骨材の性状

種 類		性状値
通過 質量 百分 率	13.2mm	100.0
	4.75	66.9
	2.36	48.5
	0.6	31.8
	0.3	23.2
	0.15	15.4
(%)	0.075	10.3
アスファルト量 (%)		5.05
針入度 (1/10mm)		19
軟化点 (°C)		69.5

表-5-17 製造温度および混合物の配合

項 目	標準 再生混合物	フォームドAs再生混合物		
		発泡補助剤 のみ	発泡補助剤+ 締固め改善剤	
目標製造温度 (°C)	170	150		
目標締固め温度 (°C)	145	125		
骨材 配合 (%)	再生骨材	70.0	70.0	70.0
	6号砕石	10.0	10.0	10.0
	7号砕石	7.0	7.0	7.0
	スクリーングラス	7.0	7.0	7.0
	粗砂	3.0	3.0	3.0
	石粉	0.0	0.0	0.0
アスファ ルト量 (%)	総アスファルト	5.60		
	新アスファルト	1.82		
	旧アスファルト	3.52		
	再生用添加剤	0.26		
発泡補助剤 (25%水溶液)	-	対新As 2%	対新As 2%	
締固め改善剤	-	-	対旧As 1%	

試験結果は、表-5-18 および図-5-9～図-5-12 に示すとおりである。

結果より、フォームド As 混合物は、標準再生混合物より締固め温度を 20℃ 低下させて比較したが、同等の締固め度が得られることが確認された。

マーシャル安定度と動的安定度は、前章の結果と同様にフォームド As 混合物の方がやや低い値を示した。しかしながら、柔軟性指数、破壊エネルギー、2 点曲げ疲労試験と NAT-SCB 試験による疲労破壊回数は、いずれもフォームド As が高い数値が得られることが明らかとなった。

ここで、「発泡補助剤と締固め改善剤」を併用したフォームド As 再生混合物は、NAT-SCB 試験による低温の疲労抵抗性が標準再生混合物と比較して低い値となっている。

第 3 章の結果では、再生混合物の疲労破壊回数は 1～3 万回程度であったのに対して、今回の結果は 9.8 万回であり、ワンオーダー高い数値になっている。これは、今回の再生混合物が設計針入度を 50(1/10mm)に調整したことから、いずれの混合物も硬質化することで疲労破壊回数が高くなったものと考えられる。したがって、相対的に標準再生混合物より低く見えるものであるが、数値的にはこれまでの検討した結果と比較すると疲労抵抗性に優れる数値である。よって、低温の疲労抵抗性に関して問題はないものと考えられる。

一方で、設計針入度を 50 に調整することで高温の硬質化が懸念されるが、2 点曲げ疲労試験の結果は第 3 章の結果と同等であることから、高温の疲労抵抗性も問題は無いと判断できる。

以上のことから、再生混合物はフォームド As と発泡補助剤を併用した製造方法を取り入れることにより、20℃ 温度が低下しても、標準的な製造方法と比較して同等の締固め度が得られ、これにより混合物性状は、同等以上の力学特性が得られると言える。

このため、フォームド As と発泡補助剤を併用した製造方法は、再生混合物の施工上の課題である締固め不足の改善に有効な方法と判断される。

表-5-18 混合物の性状試験結果

項 目	標準再生 混合物	フォームドAs再生混合物	
		発泡補助剤 のみ	発泡補助剤+ 締固め改善剤
締固め度 (%)	100.0	99.9	100.1
安定度 (60℃) (kN)	14.95	13.47	13.78
カンタプロ損失率 (20℃) (%)	15.2	15.6	15.7
動的安定度 (60℃) (回/mm)	3,938	3,500	3,000
柔軟性指数 (25℃) (FI)	2.9	4.2	5.5
破壊エネルギー (25℃) (G_f)	1,977	1,959	1,950
2点曲げ疲労試験 (40℃) (回)	51,189	59,043	67,481
NAT-SCB試験 (10℃) (回)	223,736	235,696	98,271

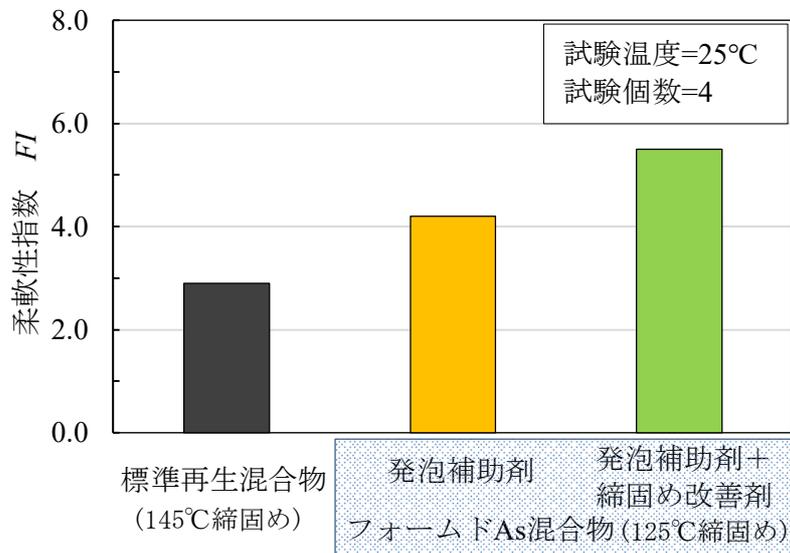


図-5-9 フォームド As の柔軟性指数

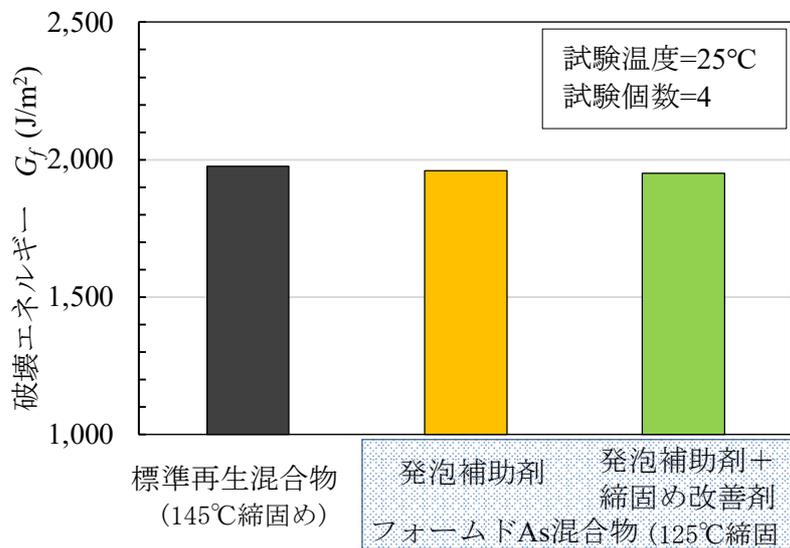


図-5-10 フォームド As の破壊エネルギー

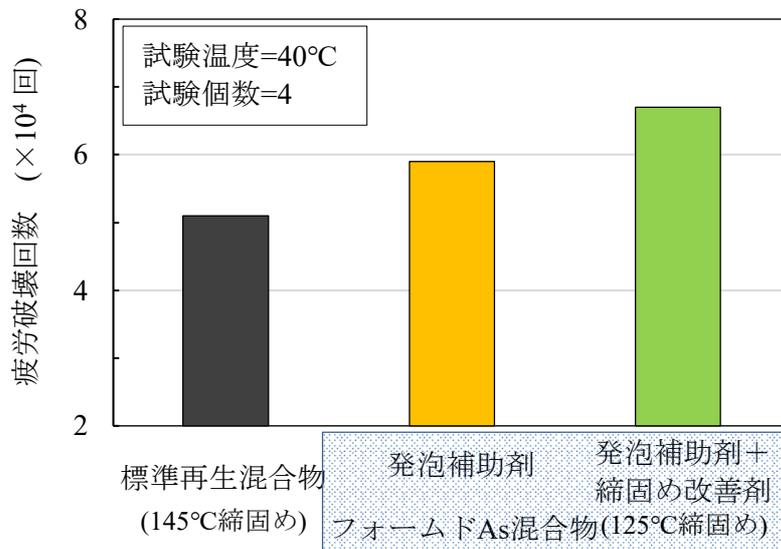


図-5-11 フォームド As の 40°C の疲労抵抗性

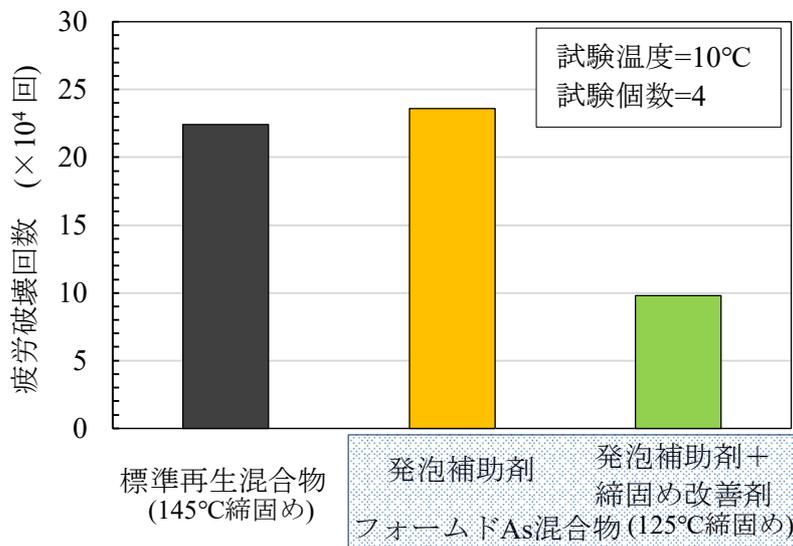


図-5-12 フォームド As の 10°C の疲労抵抗性

5.5 作業性の評価

アスファルト混合物は温度の低下にともなってアスファルトの粘性は増加するため、施工時に混合物を取り扱う際に、スコップの刺さり易さやレーキ作業の均し易さなどの作業性が低下すると考えられる。このため、混合物が温度低下した際の作業性を確認する必要があるが、作業性に関しては、一般的に定められた試験方法がない。

わが国のアスファルト混合物の作業性を評価する研究としては、貫入抵抗値を測定する方法[34][37][38]、混合物を攪拌した際のせん断抵抗性を測定する方法[35][36]、レーキ作業を模擬したせん断抵抗を測定する方法[37][39]、ルート内の混合物の流下時間を測定する方法[37][38]、ほぐれ易さを圧縮強度で評価する方法[40][41]が行われており、いずれも従来は、官能評価であった作業性を定量的に評価する方法が考案されている。

本研究では、実際の作業動作に類似する方法で、且つ、現場においても容易に確認できる試験方法であり汎用的に活用できる方法が適当と考え、既往の研究を参考に貫入抵抗測定試験を考案した。なお、試験は、練落し直後、1時間後、2時間後について実施し、同時に作業員にアンケートを実施しスコップ作業の評価を行った。

貫入抵抗測定試験は、スコップの刺さり易さを模擬的に評価する方法として、練り落された混合物の硬さを測定した。供試体は混合物を同一の圧密状態にするため、マーシャルモールドで突き固め(ランマ重量 4.5kg, 落下高さ 45cm, 回数 3回)、試験は写真-5-4 に示すように、プッシュプルゲージを貫入し抵抗値を測定する。測定深さは直径 10cm のモールドで拘束されているため表面の 1 インチ程度を評価対象とし、毎秒 1 インチの速度で貫入した。

貫入抵抗値の測定結果を図-5-5 に示す。いずれの混合物も時間の経過とともに貫入抵抗値は増加する傾向が見られ、「標準再生混合物」と比較すると「フォームド As+発泡補助剤」は貫入抵抗値が小さく、「フォームド As+発泡補助剤+締固め改善剤」の場合は僅かに大きくなった。

次に作業性のアンケート調査は、熟練作業員 20 人に舗設時のスコップ作業の容易さを表-5-14 に示す 5 段階で評価した。スコップ作業評価の結果を表-5-15 に示す。練落し直後は、いずれの混合物においても、ランク A および B と評価した人の割合は 90% 以上であったが、時間の経過とともにこの割合は減少し、2 時間後では全ての人の評価がランク C および D となった。また、スコップ作業評価の結果と貫入抵抗試験結果(図-5-10) を照らし合わせると、貫入抵抗値が 60kN 未満ではスコップ作業評価のランクは B 以上となり、貫入抵抗値が 60kN 以上 70kN 未満ではランクは C となると考えられる。

「フォームド As+発泡補助剤」および「フォームド As+発泡補助剤+締固め改善剤」の 2 時間後の評価がランク C (やや硬いがスコップ作業に問題ない) 以上である割合は 80% 以上となることから、「標準再生混合物」よりも混合物温度が 30℃ 程度低い状況においても、「標準再生混合物」と同程度の作業性を確保できることが分かった。

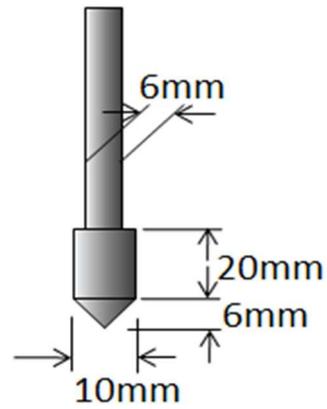


写真-5-4 貫入抵抗測定試験状況

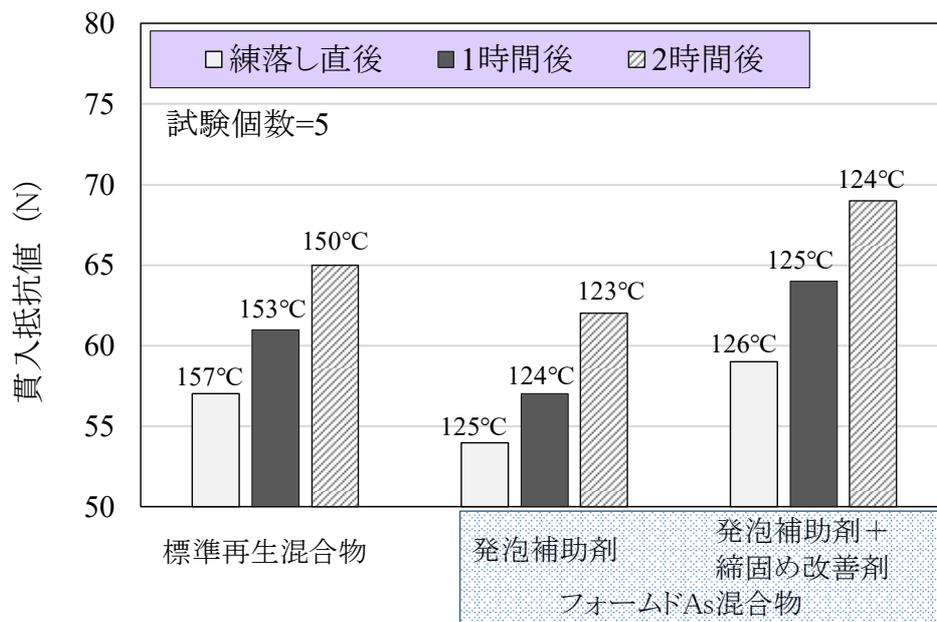


図-5-14 貫入抵抗測定試験結果

表-5-19 官能評価ランクと貫入抵抗値の関係

ランク	スコップの刺さり易さに関する評価項目
A	混合物が軟らかい(容易にスコップが刺さる)
B	新規混合物同程度
C	混合物はやや硬い(スコップ作業に問題ない)
D	スコップ作業がしにくい
E	スコップ刺さりにくい

表-5-20 スコップ作業評価試験の結果

官能評価 ランク	標準再生混合物			フォームドAs混合物					
				発泡補助剤のみ			発泡補助剤 + 締固め改善剤		
	直後	1H後	2H後	直後	1H後	2H後	直後	1H後	2H後
A	3	0	0	4	0	0	5	0	0
B	15	4	0	15	11	0	15	9	0
C	2	15	16	1	9	17	0	11	17
D	0	1	4	0	0	3	0	0	3
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0

数値は各官能評価ランクを選定した人数

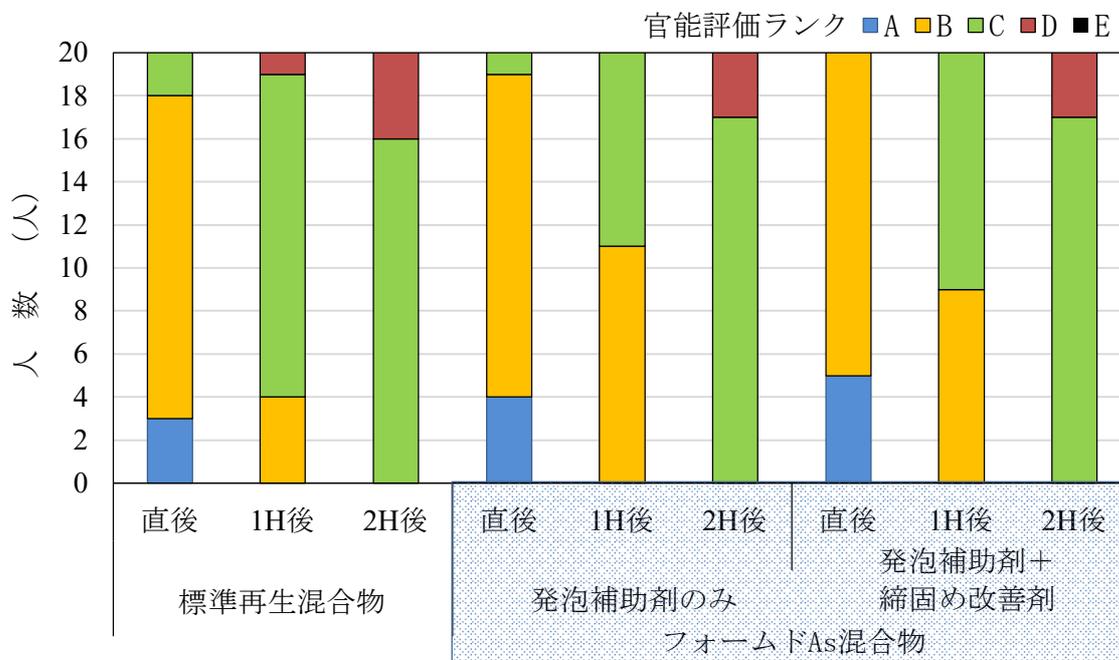


図-5-15 貫入抵抗測定試験結果

5.6 経済性の評価

本研究で開発したフォームド As と添加剤を併用した施工性改善技術についてコスト試算を行い、従来の中温化技術と比較した。

その結果は、表-5-21 に示すとおりであり、従来の中温化技術では、合材 1ton 当たりの製造価格の増額が 1000 円を要するのに対して、本研究で開発した施工性改善技術は、フォームド As+発泡補助剤では 8 割減、これに締固め改善剤を使用しても 6 割減の費用で製造することができ、大幅なコスト削減が可能である。

本研究の技術は、夏季や運搬距離が短い工事個所などの適正な締固め温度が確保できる工事に適用する必要性は低い。

しかし、寒冷期の施工や運搬中に温度低下が予想される場合は、本研究の技術を活用して締固め度を確保し、舗装の耐久性を確保する観点で重要な技術と考える。

また、本研究では作業性を確認するために製造の段階から温度低下させて検証を行い、製造温度を 20~30℃低減しても締固め度を確保できること確認している。

したがって、本技術は中温化技術にも活用できるものであり、環境負荷の低減として CO₂ 削減の目的で活用する場合も従来の中温化技術と比較して大幅なコスト削減が可能となる。

表-5-21 フォームド As と添加剤を併用した施工性改善技術のコスト比較

項 目		従来 中温化剤	フォームドAs	
			発泡補助剤	発泡補助剤+締固め改善剤
費用 (円/合材ton)	フォームド装置償却費		60	60
	材料費	800	90	290
	投入費	200	0	10
	合計	1,000	150	360

【試算条件】

※再生骨材配合率：60%、OAC：6.0%、旧アス量：5.0%

※フォームド装置価格：2000 万円、償却年数：6 年、製造数量：5 万トン/年

※締固め改善剤添加装置価格：300 万円、償却年数：6 年、製造数量：5 万トン/年

※発泡補助剤 25% 水溶液を新アスに対して 2% 添加

※締固め改善剤は旧アスに対して 1% 添加

5.7 結論

本研究は、フォームド As 混合物に発泡補助剤と締固め改善剤の 2 種類の添加材を適用した再生混合物の発泡・締固め特性ならびに混合物の力学性状について検討した。さらに、本手法を用いて実機アスファルトプラントにおいて再生混合物を製造し、締固め度および混合物性状を確認した。

得られた結果をまとめると、以下に示すとおりである。

- フォームド As の発泡状態は、水単体では 1 時間以内に発泡効果を失うのに対して、グリコールエーテル系発泡補助剤を水に対して 25% の濃度で添加することで、発泡状態を 2 時間まで持続することができる。
- 室内における締固め効果の検証では、再生骨材配合率が大きくなるとフォームド As の締固め度が低下するが、発泡補助剤と締固め改善剤を併用することで、再生骨材配合率が 80% の場合でも 99% 以上の締固め度が得られた
- 実機工場 2 か所で実施した締固め効果の検証では、フォームド As と添加剤の併用技術の効果は以下に示すとおりであり、十分な締固め効果が得られたことから、本技術は再生骨材配合率の高い再生混合物においても締固め効果の改善に有効であることが分かった。
 - ①再生骨材配合率 60%、締固め温度 30℃低減の条件で、発泡補助剤と締固め改善剤を併用したフォームド As 混合物の締固め度は 99.7%
 - ②再生骨材配合率 70%、締固め温度 20℃低減の条件で、発泡補助剤と締固め改善剤を併用したフォームド As 混合物の締固め度は 100.1%
- 添加剤を併用したフォームド As 混合物を標準再生混合物よりも 30℃低い温度条件で締め固めたところ、マーシャル安定度、圧裂強度、動的安定度およびスティフネスは標準再生混合物と比較して、僅かに低い値を示したが、新規混合物と比較すると同等以上の力学特性であることを確認した。
さらに第 3 章の評価方法でひび割れ抵抗性と疲労抵抗性を確認したところ、フォームド As と添加剤を併用した再生混合物はいずれの結果も優れていることが確認されたことから、耐久性の向上に有効な製造方法と判断される。
- 貫入抵抗測定試験とスコップ作業評価試験により混合物の作業性を評価したところ、フォームド As と添加剤を併用した技術は、標準再生混合物よりも 20~30℃低い温度条件において同程度の作業性を確保できることを確認した。
- 本研究で開発した施工性改善技術は、従来の中温化技術と比較してフォームド As+発泡補助剤では 8 割減、これに締固め改善剤を使用しても 6 割減の費用で製造することができ、大幅なコスト削減が可能である。また、当該技術は中温化技術としても活用が可能である。

【第5章の参考文献】

- [1]公益社団法人日本道路協会：舗装施工便覧，平成18年版，pp.100
- [2]公益社団法人日本道路協会，舗装施工便覧，平成18年版，pp96-98
- [3]アスファルト混合物の中温化技術，舗装，pp.3-8,1997.12.
- [4]寺田剛：中温化技術の現状，舗装，pp.9-14,2001.11.
- [5]井原務：国内外の中温化技術の現状，舗装，pp.6-9,2012.5.
- [6]吉中保，根本信行：環境保全を指向したアスファルト舗装技術に関する研究，土木学会 第2 回舗装工学講演会講演論文集， pp.239-248， 1997.12
- [7]清水浩昭，鈴木祥高：アスファルト混合物の施工性改善に寄与する舗装用添加剤の開発，道路建設， pp.28-33,2002.3.
- [8]谷口博，市岡孝夫，寅丸義正：再生アスコンの中温化および中温化混合物の貯蔵出荷に関する検討，第24回日本道路会議，9230,2001.
- [9]大沼美彦，岡本信人，岡林正俊：再生骨材を使用した中温化技術の検討および試験施工例，第24回日本道路会議，9229,2001.
- [10]山崎修一，藤田広志，近藤邦彦：再生アスファルト混合物への中温化技術の適用例，第24回日本道路会議，9228,2001.
- [11]渡辺直利，清水忠昭，佐藤慶彦：中温化技術の再生アスファルト混合物への適用事例，舗装，pp.7-12,2011.9.
- [12] 吉中保，根本信行：各種加熱アスファルト混合物における中温化技術の適用効果，舗装，pp.4-11,1999.9.
- [13]中村好和：中温化アスファルトの製造検討，ENEOS Technical Review 第57巻，第3号，pp. 28-32， 2015.10.
- [14]吉中保，荒井孝雄：アスファルト舗装の寒冷期施工への中温化技術の適用検討，道路建設， pp.42-47,2000.12.
- [15]高野進，安倍隆二，四辻勝：中温化剤を用いた表層混合物の寒冷期施工例，第24回日本道路会議，9165,2001.
- [16]森修二，岳本秀人，安倍隆二：寒冷期における中温化舗装技術の適用，舗装， pp.26-29,2002.5.
- [17]NCHRP:NCHRP PRACTICE-READY SOLUTIONS FOR Warm Mix Asphalt,RESEARCH TOPIC HIGHLIGHTS,2017.
- [18]Cindy,Estakhri.:LABORATORY AND FIELD PERFORMANCE MEASUREMENTS TO SUPPORT THE IMPLEMENTATION OF WARM MIX ASPHALT IN TEXAS,2012.
- [19]MAXAM:Submitted in Accordance with Caltrans Approval Process for Warm Mix Asphalt Technologies,AQUABlack Warm Mix Asphalt Technology.2012.
- [20] NCHRP:Long-Term Field Performance of Warm Mix Asphalt Technology, NCHRP RESEARCH REPORT 843,2017.
- [21]技術委員会 技術政策等情報部会：欧米における中・低温混合物へ取り組み，道路建設，pp.50-51,2009.5.
- [22]NAPA:Asphalt Pavement Industry on ,Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2014.2014.
- [23] 社団法人 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，昭和53年6月
- [24] 岡林正俊，久下晴己：フォームドアスファルト工法の現況，道路建設， pp.49-54， 1996.9

- [25]美馬孝之、徳光克也、岡本信人：フォームドアスファルトを利用した中温化混合物の施工事例，第23回日本道路会議論文集，5078,1999
- [26]工藤 朗，徳光克也，木田和伸，河村泰博：マイクロバブル型フォームドアスファルトを利用した中温化技術，舗装，pp.5-9, 2014.11
- [27]新垣善雄、平嶋政臣、徳光克也：フォームドアスファルトによる再生混合物の中温化，第31回日本道路会議論文集，3103,2015
- [28]清水泰成、越健太郎、江向俊文：フォームドアスファルト技術を用いた施工性改善型混合物の適用事例，第32回日本道路会議論文集,3017,2017
- [29]江向俊文，齋藤啓大，河合真邦：微細泡に改良したフォームドアスファルトによる再生アスファルト混合物の検討，道路建設，pp.50-56, 2013.9
- [30]越健太郎、今井龍一：高再生率アスファルト混合物の品質確保と安定供給，土木学会論文集 E1(舗装工学)，pp.147-154,vol.73,No.3,2017
- [31]岩間：フォームド発生装置による含水量とアスファルト混合物性状に関する実験的検討 土木学会年次講演会，pp65-66,v-033, 2017
- [32]海老澤秀治，坂本康文，佐々木雅之，五傳木一：ケミカルフォームドアスファルトを用いた中温化技術，舗装，pp.19-24, 2000.10
- [33]公益社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧(A046),pp.184-195
- [34]K.E.Cooper et al. : Development of a Practical Method for Design of Hot-Mix Asphalt, TRR, No.1317, 1991.
- [35]岩間：Nottingham Asphalt Tester(NAT)によるアスファルト混合物の評価方法について，アスファルト，Vol.58, No.231, 2016
- [34]峰岸順一、小林一雄、上野慎一郎：低騒音舗装の破損実態と補修用常温混合物の室内評価法の検討，平成19年度東京都土木技術センター年報,pp.67-77,2007,
- [35]黄木秀実、小野寺陵太郎：排水性混合物における細骨材の種類と作業性の関係に関する一検討，第25回日本道路会議,09156,2003
- [36]真壁匡史、高謙、村田純：アスファルト混合物の作業性評価方法の提案，第29回日本道路会議,3017,2011.
- [37]村井宏美、伊藤大介、鷲巣晃英：アスファルト混合物の各種作業性評価方法に関する検討，舗装,pp17-22,2017.11.
- [38]加藤哲郎、渋谷卓人、吉田省吾：常温合材の性能評価に関する一検討，第32回日本道路会議,3P01,2017
- [39]源藤勉、村井宏美、柿沼千絵美：常温アスファルト混合物の作業性評価方法に関する一検討，第32回日本道路会議,3132,2017.
- [40]今井宏樹、伊藤達也、増山加奈子：排水性混合物の作業性の評価方法に関する一検討，第25回日本道路会議,09155,2003
- [41]清水泰成、江向俊文、小林真之：アスファルト混合物のほぐれ易さに着目した作業性評価試験方法に関する一検討，第69回土木学会年次学術講演会 ,pp.997-998,v-499,2014.9.

第 6 章

結論と今後の課題

第6章 結論と今後の課題

6.1 結論

高度経済成長後の一定の舗装ストックが確保されたわが国において、道路の維持管理を効率的に行ない、且つ廃棄物の低減を要求する社会情勢に対応するには、アスファルト舗装のリサイクルは必要不可欠な方法であった。

しかし、過去40年にわたって行われてきたわが国のリサイクルは、アスファルト舗装発生材を大量且つ高配合率で活用する製造技術に関して発展してきたが、品質や持続的活用を加味した計画的な方針は少なく、この結果、再生骨材の老朽化が進行し、規格を外れる再生骨材が増加したことから、今後は持続的な再生利用が困難になるおそれがある。

一方、再生混合物の設計図書には、再生混合物の主な破損形態であるひび割れに関して、定量的に評価できる方法は記されておらず、再生混合物の品質評価方法に関しては、未だに確立されていない。

また、この設計図書は、今から35年ほど前に発刊されたが、その後、再生骨材の老朽化や改質由来の再生骨材の増加があり、様々な組成の再生用添加剤が市販されるなど、品質に関わる多くの要素に変わっている中で、設計図書の大幅な改定が必要な時期に来ている。

今後も高い配合率で用いることが予想されるわが国の実情を踏まえると、再生骨材の低針入度化はリサイクルを持続する上で重要な課題であり、この解決には再生混合物の力学性状を適切に評価する方法を確立し、品質を確保するための技術を開発することが求められる。

本研究は、アスファルト舗装の持続的な再生利用技術を確立することを目標とし、再生混合物の評価方法が確立していない現状を踏まえ、再生混合物の力学特性を適切に評価する試験方法を見出すことから研究した。

また、繰り返される再生利用によって老朽化が進行した再生骨材を使用しても、再生混合物の品質を確保できる技術を研究した。

以下に、本研究で得られた成果について示す。

① 再生アスファルトについて

再生アスファルトの感温性は、再生混合物の評価の基礎的要素となるため、その性質を確認した。再生アスファルトは、25℃の設計針入度を調整しても、アスファルトの劣化の進行に伴い、25℃よりも高温側では硬質化し、低温側では軟質化する傾向があることを見出した。

② 再生混合物の評価方法

再生混合物を評価する3種の試験方法を考案し、これらの方法で再生混合物の力学特性の定量的な評価を可能とした。その評価項目と試験方法、試験条件を示す。

◆リフレクションクラックに対するひび割れ抵抗性は25℃で実施するSCB試験によって、再生骨材の劣化程度や配合率の影響を定量的に評価できる。

- ◆ わだち割れに対する疲労抵抗性は、40℃で実施する2点繰り返し曲げ試験によって、再生骨材の劣化程度や配合率の影響を定量的に評価できる。
- ◆ 疲労ひび割れに対する疲労抵抗性は、10℃で実施するNAT-SCB試験によって、再生骨材の劣化程度や配合率の影響を定量的に評価できる。

③ ひび割れ抵抗性の評価

SCB試験から得られたひび割れ抵抗性の評価に関する知見を以下に示す。

- ◆ SCB試験から得られる柔軟性指数 FI と破壊エネルギー G_f には強い相関があり、 G_f によってひび割れ抵抗性を評価できる。
- ◆ 再生骨材の劣化が大きく、再生骨材配合率が増加するほど G_f は低下し、ひび割れ抵抗性が低下する。
- ◆ SCB試験の G_f と圧裂試験の G_f には強い相関があることから、 G_f を用いることで圧裂試験によってもひび割れ抵抗性を評価できる。

④ 疲労抵抗性の評価

2点繰り返し曲げ試験とNAT-SCB試験から得られた疲労抵抗性の評価に関する知見を以下に示す。

- ◆ 高温域では、再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約5%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数は10～15%低下する。
- ◆ 低温域では、再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約20%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数が20～50%低下する。
- ◆ 上記のことは、劣化した再生骨材であっても配合率を低下させることで再生混合物の品質を担保できる可能性があることを示すものである。

⑤ 再生用添加剤の添加量、アスファルト量、アスファルト種の影響

再生用添加剤の添加量、アスファルト量および使用するアスファルトの種類が再生混合物の力学性状に及ぼす影響に関する知見を以下に示す。

- ◆ 再生用添加剤の添加量の増加に伴い G_f が低下する。
- ◆ 再生混合物のアスファルト量の増加に伴い G_f が増加するが、再生用添加剤の影響の方が大きい。
- ◆ 再生混合物のひび割れ抵抗性を高めるには、針入度の高い新規アスファルトを用いることが有効である。

⑥ 再生用添加剤の浸透状態を改善することによる品質向上効果

再生混合物の品質向上の方法として、常温状態の再生骨材に再生用添加剤を散布し一定期間養生した後に加熱して再生混合物を製造する事前添加方式を考案した。事前添加方式で製造した混合物の向上効果に関する知見を以下に示す。

- ◆ 事前添加方式は、通常の製造方法と比較して常温域におけるひび割れ抵抗性(FI と G_f)が20～30%程度向上し、高温域と低温域における疲労抵抗性は40～50%向上する。また、実機工場でも室内と同様の結果が得られた。

- ◆事前添加方式の養生期間は3日以上が望ましい。
- ◆室内の結果では針入度が20から14に低下すると、 G_f は20～30%低下、疲労抵抗性は20～50%低下するのに対して、事前添加方式を適用すると G_f と疲労破壊回数は約30%向上することから、針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として非常に有効である。

⑦ 再生用添加剤の組成の影響

再生用添加剤の組成と再生混合物の力学特性との関係に関する知見を以下に示す。

- ◆芳香族分が多い添加剤は、ひび割れ抵抗性の向上に有効である。
- ◆低温域の疲労抵抗性は、添加剤の種類が大きく影響し、芳香族成分の多い添加剤は疲労抵抗性が向上する。
但し、添加量や粘性の影響もあると考えられ、今後の検証課題である。

⑧ 再生用添加剤の組成と事前添加方式の品質向上効果

事前添加方式の品質向上効果に対して、再生用添加剤の組成が及ぼす影響に関する知見を以下に示す。

- ◆芳香族成分の少ない添加剤は事前添加方式によるひび割れ抵抗性や疲労抵抗性の向上効果が少ない。
- ◆芳香族成分が70%程度含む添加剤は事前添加方式によって、低温域の疲労抵抗性を約3倍向上させる効果がある。
- ◆ひび割れ抵抗性と疲労抵抗性の向上には、芳香族成分が多い添加剤が有効であり、事前添加方式を組み合わせることで、さらに混合物性状が向上する。これらの知見は、針入度が低い再生骨材の品質を向上させる方法として有効である。

⑨ 再生混合物の締固め特性と施工性の改善

再生混合物はアスファルトの劣化や改質成分の混入から施工時の粘性が高くなることから、締固め特性や施工性の低下が懸念されるため、これらを改善する技術を開発した。その成果は以下のとおりである。

- ◆発泡補助剤を添加したフォームドAsと締固め改善剤を併用する（以下、本研究の製造技術）ことで再生混合物の締固め特性と作業性を改善できる。
- ◆その効果は、室内検証では再生骨材配合率が80%の混合物が標準よりも締固め温度が30℃低下しても、99%以上の締固め度が得られる。
実機工場の検証では再生骨材配合率60～70%、締固め温度20～30℃低減の条件でほぼ100%の締固め度が得られる。
- ◆締固め効果は、従来の中温化剤と同等の効果があるが、製造コストは従来の中温化剤の約30%程度であり、本研究の製造技術は経済性に優れる。
- ◆本研究の製造技術によって製造した混合物は、標準よりも30℃低い温度で締め固めても、標準混合物と同等の力学性状があり、同等以上のひび割れ抵抗性と疲労抵抗性があることから、耐久性の向上に有効な製造方法である。
- ◆本研究の製造技術によって製造した混合物は、標準よりも20～30℃低い温度条件において同程度の作業性を確保できる。

6.2 本研究の意義

本研究の成果は、これまで、再生混合物の力学特性に関して、総合的に評価できる試験方法がなかったが、再生骨材の劣化程度や配合率の影響を定量的に判定できるようになった。このことは、従来使用することが出来なかった老朽化した再生骨材であっても、混合物に適用する配合率を低減することによって、適用の可能性を示したものである。

再生混合物の破壊形態は、主にひび割れであるが、ひび割れ発生のメカニズムに対応し、3つの温度域で評価試験方法を考案することで、定量的な評価を可能とした。

このことは、今後の再生混合物の耐久性確保の基準を設定する上で、具体的な判定方法を提示したことになる。

また、本研究が行った試験方法は、汎用的な試験方法ではないが、圧裂試験から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が可能であり、これを見出したことは、汎用的な評価方法に関して道筋を提示したことになる。

再生用添加剤の添加量が再生混合物の耐久性に大きく影響することが判明したことは、再生用添加剤の性状やその添加方法に関して重要性が高いと言える。

したがって、今後、持続的な再生利用を行う上で、これらの改良を行うことが最も有効であることを示したことになる。

本研究では、再生混合物のひび割れ抵抗性と疲労抵抗性を向上させる方法として、事前添加方式を考案した。この方法を用いて混合物を製造すると、ひび割れ抵抗性と疲労抵抗性を30%以上向上させることができることから、再生混合物の品質向上や老朽化した再生骨材の活用を拡大できる可能性を示唆している。

また、最も改善効果に優れる再生用添加剤と事前添加方式を組み合わせると、従来の製造法と比較して、疲労抵抗性を7倍程度向上できることから、再生混合物の持続的な活用に貢献できる知見を得たことになる。

本研究は、わが国の道路整備が直面しているアスファルト舗装の持続的なリサイクルに関して、課題解決の糸口を見出し、具体的な解決策を提示した。このことは、持続的な社会形成を目的とするSDGsの考え方にも合致したものであり、この技術が広く社会に活用されることを望む。また、舗装業界において、温室効果ガスの主たる排出要因である合材製造に関しても、これを抑制する技術としても有効であり、社会に貢献できる技術と考える。

6.3 今後の課題と展望

本研究で得られた成果を踏まえ、以下に残された課題を示す。

① 再生混合物の評価試験方法について

本研究は3種の試験方法を行っているが、いずれの試験機も国内に数多くあるものではなく、誰もが容易に活用できるものではない。

このため、本研究では圧裂試験との相関を把握することで、汎用的な試験方法を見出す検討を行ったが、さらに事例数を増やして信頼性を高める必要がある。

また、これにより、ひび割れ抵抗性の評価に関しては、汎用化の可能性はあるが、疲労抵抗性の評価に関しては、別途、簡易な試験方法を見出す必要がある。

次に供試体作製に関しては、いずれの試験も供試体作製を厳格に行う必要がある。その 1 つは供試体密度の違いにより試験結果の変動が大きいことから、供試体を適切な密度に作製することに関して、従来の試験以上に留意する必要がある。

特に SCB 試験においてはジャイレトリコンパクタを使用するため、混合物が変わると回転数の設定をその都度行う必要があり、密度調整が難しいことが、今後の改良点である。

2 点目は、供試体の成形に関しても厳格に行う必要があり、特に SCB 試験のノッチ（供試体底部に設置する切り込み）の深さや、2 点繰り返し曲げ試験の供試体の切り出しに関しては 1.0mm 未の規格値を満足する必要があり、時間と手間を要することが課題である。

このため、供試体成形を自動化するなど、技術的な改良が必要である。

② 評価基準の設定について

本研究では、再生混合物の力学特性を評価できる新たな試験方法を見出した。

しかしながら、試験値の適否を判定する評価基準に関しては、現時点で整理されていない。評価基準を設定するには、従来、適用されてきた再生骨材の規格値を判定基準に設定する方法も考えられるが、最終的には実路における供用性状を確認し、これと混合物の試験結果を結び付ける必要があり、このことが今後の大きな課題である。

今後、試験施工を実施し、評価基準の設定に関する検証を行う予定である。

③ 事前添加方式について

本研究では、再生用添加剤を常温の再生骨材に事前に散布する方法を検討した。

しかし、この方法を実際の工場で継続的に実施する場合は、以下の課題を解消する必要がある。

- ・引火性のある再生用添加剤を添加した後にバーナ加熱をするため、直火バーナの場合は再生骨材に引火する可能性があり、安全性の検証と消防法の適否を確認するが必要である。
- ・再生用添加剤を散布して 3 日以上養生が必要なため、養生中の保管方法について検討が必要であり、例えば、降雨による油脂分の流失の検証と水質汚濁に関する法令を確認する必要がある。
- ・再生用添加剤の事前添加によって再生骨材は軟質化するため、このことで再生ドライヤ内部にアスファルト分が付着し易くなることが考えられる。通常は定期的ななはつり作業によってこれを撤去するが、合材製造に副次的発生する作業負担に関して検証を行う必要がある。

④ 再生用添加剤について

本研究では、芳香族成分を多く含む再生用添加剤が、ひび割れ抵抗性や疲労抵抗性の向上に有効であることを明らかにした。しかし、今後、以下に示す事項についても検証が必要である。

- ・再生用添加剤の粘性や添加量も大きな違いがあるため、これらの影響に関しても今後、検証する必要がある。

- ・また、再生用添加剤の添加量は、コストにも大きく影響するため、費用対効果を検証する必要がある。
- ・再生利用は今後も継続的に行われることから、繰り返し再生を行った際に劣化進行の少ない添加剤について把握する必要がある。
- ・近年の海外の動向としては、再生用添加剤に植物油を適用する研究が進められ、大豆油や菜種油あるいはカシューナッツ油などを活用する技術が散見されている[1][2][3][4]。

植物油の適用性は、わが国の再生用添加剤の規格値に粘度が適用しない場合が多いが、繰り返し再生した際の劣化抑制効果が高いと考えられており、さらに鉱油を使用しないことで環境にも配慮した再生方法として評価されていることから、今後の検証が必要である。

【第6章の参考文献】

- [1]Maria Chiara Cavalli,Lily D Poulidakos : Micromechanical surface investigation of bio modified RAP binder, ISAP Padova Symposium 2019.9.
- [2]Sujit Kumar Pradhan,Umesh Chandra Sahoo : Impacts of recycling agent on Superpave mixture containing RAP, ISAP Padova Symposium 2019.9.
- [3]Reza M. Pouranian, Reyhaneh Rahbar-Rastegar,John E. Haddock : Development of a soybean-based rejuvenator for asphalt mixtures containing high reclaimed asphalt pavement content, ISAP Padova Symposium 2019.9.
- [4](一社)日本道路建設業協会 国際技術交流部会・海外技術WG：植物由来の再生用添加剤,道路建設,pp.80-83,2021.9

謝 辭