

論文の内容の要旨

氏名：赤 津 憲 吾

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：水を用いたアスファルト混合物の分別再資源化技術と品質管理手法の開発

わが国の道路整備は戦後の国土復興のため、1950年代中期に本格的に行われ、2017年には、一般国道の簡易舗装を除く舗装済み延長の整備率が93.0%に達している。また、道路舗装は施工性や走り心地の良さなどからおよそ95%が加熱アスファルト混合物（以下、混合物）を用いたアスファルト舗装で占めている。

一方で、維持修繕工事に伴う建設廃材の不法投棄などが社会問題となり、1970年に「廃棄物の処理および清掃に関する法律」が制定され、舗装工事により発生する既設のアスファルト舗装材（以下、発生材）は産業廃棄物に指定され、処分に制約が生じることとなった。また、省資源、省エネルギーが社会的趨勢となってきたことなどを背景に、1970年代中期頃から発生材の再生利用に関する研究が始まり、現在、発生材は再生加熱アスファルト混合物（以下、再生混合物）に用いるアスファルトコンクリート再生骨材（以下、再生骨材）や再生路盤材などに用いる再生碎石に再資源化され、再資源化率は99%を上回っている。

現行の再生骨材への再資源化技術は、発生材を機械破碎および分級により粒状化することで、量的に高水準な再資源化を実現しており、2018年には、混合物の全出荷量に占める再生混合物の割合は74.9%に達している。また、2018年には、再生混合物中に占める再生骨材配合率の全国の平均が51.4%に達している。他方で、近年、混合物に使用する新規材料である、アスファルトや骨材の供給力の低下が懸念されている。これらより、劣化と再生を複数回繰返した再生骨材は、今後増えることが予測されるとともに、再生骨材の需要はますます増加すると考えられる。しかしながら、劣化と再生を複数回繰返した再生骨材の利用に関しては、既に室内試験により、旧アスファルトが酸化劣化を蓄積していることや配合した再生混合物のひび割れ抵抗性が低下する可能性を確認されている。

混合物の製造における品質管理項目である、アスファルト量および粒度は、アスファルト抽出法により厳密に把握することができる。しかしながら、使用される溶剤は1995年末に1,1,1-トリクロロ・エタンがオゾン層破壊物質として廃止されて以降、人体や環境に対する安全性への配慮からナフテン系やリモネン系の溶剤が代替され、それらの溶剤は、改質アスファルトや再生混合物に対する溶解性能、試験時間に課題を残している。一方で、再生骨材は、再生混合物の繰返し利用に伴い、アスファルト量や骨材粒度にバラツキを生じさせることが懸念されており、今後、再生混合物は製造後に厳密な品質管理を行う必要性が求められる。

本研究は、高温高圧水が混合物からアスファルトと骨材に分離する性能を有していることを既往研究で確認していることから、まず、亜臨界水を用い、多様なアスファルト混合物に適用可能なアスファルト抽出試験法を提案、つぎに、常圧の熱水（80～90℃）を用い、多様な発生材に適用可能な熱水すりもみ法による分別再資源化技術を開発、さらに亜臨界域の高温高圧水を用いた、劣化したアスファルトの性状回復技術を開発することを目的に実施したものである。

本論文は、全6章から構成されており、以下に各章ごとの要旨を述べる。

第1章 序論

本章では、アスファルト舗装発生材の再生利用について、わが国におけるこれまでの経緯を整理した上で、「研究の背景」および「研究の目的」を示すとともに、「論文の構成」について概説した。

第2章 加熱アスファルト混合物の現状と高温高圧水の特性

本章では、わが国の混合物の需要と供給について、アスファルト舗装の現状と新規材料の需給バランス、発生材の再生利用の現状を示した。つぎに、再生混合物の繰返し利用について、現行の再生利用技術の課題を整理した。さらに、本研究で適用する高温高圧水の特性について概説し、高温高圧水を用いアスファルト混合物から骨材とアスファルトを分離する既往研究を整理することで、高温高圧水のアスファルト抽出法や分別再資源化技術への応用の可能性と課題を整理した。

第3章 亜臨界水を用いたアスファルト抽出試験法の提案

現行の抽出試験方法には、常圧式ソックスレー抽出法等があるが、使用される装置及び溶剤は、機関によって様々である。特に溶剤に関しては1995年末に1,1,1-トリクロロ・エタンがオゾン層破壊物質として廃止されて以降、人体や環境に対する安全性への配慮からナフテン系やリモネン系の溶剤が代替されている。また、これらの代替溶剤の検討と並行して、抽出器の自動化が図られたこともあり、アスファルト抽出試験は近年、日常的な品質管理試験として安全性と効率性が改善されつつある。しかしながら、各種溶剤を用いる試験法に関しては、溶剤の発がん性や生殖毒性、廃液・乾燥方法をはじめ、抽出装置・溶剤のコストおよび改質アスファルトに対する溶解性能、試験時間の課題を残しており、今後も作業環境の安全性を担保する更なる改善検討を要している。

既往研究において、有機溶剤等を一切用いることなく、水を溶媒とした環境調和型アスファルト抽出試験の開発に取り組んでおり、高温高圧水がアスファルト抽出溶媒として適用できる可能性を明らかにしている。また、既往研究では実用を勘案した検討の中で、超臨界域に比べて取り扱いが容易な亜臨界域に焦点を絞り、350°C・16MPaの亜臨界水を溶媒とした抽出試験法を提案している。ただし、上述の成果では、ストレートアスファルト(60-80)を被膜した混合物からアスファルトを抽出しきることが困難であり、多種のアスファルトへの適用に課題を残していた。

本章では、ストレートアスファルト(60-80)を被膜した混合物、再生混合物に対する課題を克服した抽出試験機、試験方法の改良を行い、多種のアスファルトへ適用したアスファルト抽出試験方法の確立を試みた。その結果、改良を加えた本試験機および試験法が、ストレートアスファルト(60-80)を含有した混合物を含む多種の新規混合物、および再生骨材へ適用可能なアスファルト抽出試験法であることを確認した。

第4章 アスファルト舗装発生材に対する分別再資源化技術の開発

わが国では2000年以降、発生材の再資源化率は99%以上となっている。しかしながら、1990年代以降、多様な改質材、または他産業再生資材を含む混合物の普及、また、発生材の繰り返し再生利用に伴い、発生材の品質は多様化している。一方、わが国では、ポリマー改質アスファルトが広く用いられており、特に、ポリマー改質アスファルトを含有したポーラスアスファルト混合物は、走行安全性の向上や交通騒音の低減などの効果を有していることから、高速道路をはじめ高規格道路に広く普及している。しかしながら、供用後のポリマー改質アスファルトを含有した発生材は、多様な改質材を含んでいること、劣化したポリマー剤は硬化が進行しており、団粒化した発生材の粒度の変動が大きいことから、再生混合物への利用に関して、品質管理や配合に課題を残している。近年、多くのポーラスアスファルト混合物が更新時期を迎えおり、ポリマー改質アスファルトを含有した発生材の再生利用方法の確立が急務となっている。

本章では、既報研究により、旧ストレートアスファルトを含有した発生材から素材に近い状態まで復元した1-13mmの骨材を分別回収できることを確認していることから、ポリマー改質アスファルトを含有した発生材に対して常圧の熱水(80~90°C)を用いた熱水すりもみ法を適用することを試み、分別回収した骨材の性状および品質試験、回収した骨材を配合した再生混合物の曲げ強度により評価した。その結果、熱水すりもみ法はポリマー改質アスファルトを含有した発生材から、素材に近い状態まで復元した1-13mmの骨材を分別回収できることを確認した。

また、熱水すりもみ法により、凝集した旧アスファルトを含有している0-1mm微粒分について、有機物の分解能力を有する亜臨界域の高温高圧水を用いて、アスファルトの性状回復技術に関する基礎検討を行った。その結果、劣化したアスファルトの性状が回復する可能性を示唆した。

第5章 劣化アスファルトに対する水熱分解法の回復効果の検討

既報研究において、亜臨界水域(200~350°C)の高温高圧水による“水を用いたアスファルトの再生”に関する検討がなされている。その結果、劣化したアスファルトの性状は反応温度350°C・反応時間15分において、新規アスファルトの規格に近づくことを確認している。しかしながら、劣化アスファルトを元の性状に回復させるのに最適な反応条件、ストレートアスファルトは原油の産地、採取時期や蒸留方法が異なれば、基本物理性状が同程度のストレートアスファルトでも化学的性状が異なることが知られており、このような異なる性状のストレートアスファルトに対する回復効果の違い、現在、再生混合物に用いている再生用添加剤による劣化アスファルトの回復技術と比較して、高温高圧水による回復技術の優位性、高温高圧水により回復させたアスファルトを混合物に適用した場合、混合物の評価として最も重要なひび割れ抵抗や流動抵抗に対する効果、以上のような課題が未解決であった。

本章では、構成成分比率の異なるストレートアスファルト（60-80）を劣化させ、前述した課題の検討を実施した。その結果、反応温度 350～360℃、反応時間 15 分程度の反応条件で基本的な物理的性状において回復が期待でき、また、従来の再生技術と比較して、化学的性状において優位性があることを確認した。また、水熱分解後のアスファルトは動的粘弾性状より、改質アスファルトと類似したバインダー性能を発揮する可能性があり、繰り返し再生利用に際して旧アスファルトの付加価値を高める可能性があることを示唆した。

第6章 結論

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