

9 持続可能な建設リサイクルのための社会インフラ建設技術の開発

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：材料資源研究グループ長 西崎 到

研究担当グループ：地質地盤研究グループ（地質）、道路技術研究グループ（舗装）、材料資源研究グループ、寒地基礎技術研究グループ（防災地質）、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料、寒地道路保全）

1. 研究の必要性

循環型社会の実現に向け、各方面で様々な取り組みが実施されている。行政施策の根拠として循環型社会形成推進基本計画が策定され、枯渇性資源をリサイクル等により長く有効活用する方向性が出されている。これを受けて、建設材料の分野においても、再生材料の有効活用に向けた取り組みが行われており、一定の成果を挙げつつある。一方で、既存インフラの更新時期を迎え、今後建設副産物の発生増加が見込まれるとともに、新たな建設プロジェクトを控え、建設発生土の発生が見込まれ、その円滑な活用のための方策も期待されているところである。

新規の建設需要の減少が見込まれるなか、今後も建設副産物が持続的に活用され、滞留や最終処分量の増加を招かぬようにするには、建設副産物のさらなる有効活用の道を広げることが必要となる。

本研究プロジェクトは、建設副産物としてとりわけ発生量の多い、セメントコンクリート塊・アスファルトコンクリート塊、ならびに今後も対応が必要となる建設発生土を、主な研究対象として取り上げ、再生利用の維持・拡大に向けた技術的研究を行うものである。

2. 目標とする研究開発成果

建設副産物をより積極的に建設資材として活用していくためには、再生材料の使用に際して直面する環境安全性について、問題が生じないことを示していく必要がある。また、再生材料を用いたコンクリートやアスファルト混合物について、新規の材料で製造された場合に比べて、品質の信頼性に対して、懸念がもたれる傾向にある。ただし、すべての使用用途について求められる性能は同一ではなく、厳しい供用環境におかれぬ構造物や部位については、それに適合した要求性能を設定することが可能である。こうした柔軟な判断を行うことにより、新規の資材と比べて若干品質の劣る場合であっても、支障なく使用ができる。すなわち、使用条件に合った適材適所の活用方法を見出すことが目標となる。

このような背景から、以下の達成目標を設定した。

- (1) 適材適所のリサイクル材等利活用技術の構築
- (2) リサイクル材等の環境安全性評価・向上技術の構築

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和元年度までに実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 適材適所のリサイクル材等利活用技術の構築

再生骨材が硬化コンクリートの品質に与える影響を確認する実験を実施した。アルカリ骨材反応（ASR）への影響としては、2年にわたる実験の結果、再生骨材コンクリートの ASR 膨張が普通骨材使用コンクリートより大きくなる傾向は確認されなかった。凍結融解抵抗性に関しては、再生粗骨材 M の耐凍害性評価試験方法が JIS A 5022 に示されているが、試験に用いる溶液を 3%塩水に変えることで試験サイクルを 10 サイクルから 1 サイクルに短縮できる簡易法を提案した。また塩分環境下では凍害によるスケーリング劣化が顕在化するが、再生粗

骨材を用いることによる影響はスケーリングの初期段階ではほとんど現れず、スケーリングが進行して粗骨材が露出する状態になった以降に顕在化することが分かった。乾燥収縮対策については収縮低減剤の使用によって乾燥収縮量を普通骨材使用コンクリートと同程度に抑制できることと、耐凍害性に悪影響が無いことを確認した。再生粗骨材の品質変動を半年間にわたり調べた結果、再生粗骨材 M の品質を満足する範囲であれば、圧縮強度や耐久性に与える品質変動の影響は小さい結果を得た。また、再生粗骨材中に混入する 5mm 未満の骨材粒子の影響についても、強度や耐久性に与える影響は小さいことを確認した。再生細骨材の有効利用に関して、再生細骨材の密度および吸水率試験方法として、JIS A 1109 のフローコーン法で試験が可能であることを示した。さらに、これらの土研の成果と、平成 30 年度から実施した東北地方整備局および宮城大学との共同研究により、凍結防止剤散布地域においても再生粗骨材 M を使用できる用途が立ったので、その成果を「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係るガイドライン（案）」としてとりまとめた。

アスファルトコンクリート塊の高い再資源化率を持続的に維持していくため、繰り返し利用された再生骨材(低品位リサイクル材)の影響の懸念および積雪寒冷地での課題に対して、再生骨材・混合物の品質に応じた適用条件等を明らかにするための実験を実施した。アスファルト混合物の繰返し再生による影響の把握については、室内において組成の異なる再生用添加剤を用いてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し実施し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。その結果、アスファルトを繰返し再生することによって、再生用添加剤の成分により再生アスファルトの軟化点の上昇傾向や飽和分・芳香族分の成分組成に顕著な差が現れることがわかった。また、高温カンタブロ試験結果はホイールトラッキング試験機を利用した疲労試験と高い相関性が得られ、簡易なひび割れ抵抗性試験方法として可能性があることを示した。さらに、積雪寒冷地における再生骨材および再生混合物の性状について、舗装工事箇所より採取した試料に対して評価を行うとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料および歩道用路盤材料としての適用性について検証を行った。また、北海道地域で用いられている針入度規格 80-100 の再生混合物においても、圧裂係数の品質規格を満たす再生骨材を使用した場合には、舗装設計便覧に示される再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係より設計圧裂係数を 0.25~0.40 MPa/mm と設定することで、設計圧裂係数による配合設計が可能であることを示した。

自然由来重金属等を含む建設発生土に関し、これまでの研究成果、現場対応事例などを踏まえ、「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル」の改訂に向けて、合理的な対応の基本的考え方を整理した。また、発生源濃度、搬出先の地下水摂取リスクおよび対策工の不確実性を考慮した、建設発生土の搬出先および対策工の選択方法、および要対策土対応の目標設定から対応方法の選定までの実務的な手順を提案した。

(2) リサイクル材等の環境安全性評価・向上技術の構築

近年、アスファルトヒュームの発生による環境安全性の問題が指摘されている。環境安全性を向上させるためには、アスファルトヒュームの発生を抑制する必要があるとあり、中温化技術はそのための手法として有効であると考えられる。日本では、アスファルト混合物の出荷量のうちおよそ 75% が再生アスファルト混合物であることから、中温化技術の普及には再生アスファルト混合物への適用が必須である。しかし、通常のアスファルト混合物に対して中温化技術はほとんど適用可能になっているものの、再生アスファルト混合物ではまだ一般的に適用可能となっておらず、製造手法や品質規格の確立には至っていない。このため、国内で製造可能な複数の再生中温化アスファルト混合物の圧裂試験や高温カンタブロ試験を実施し、初期性状について調査した。また、促進劣化による再生中温化アスファルト混合物の性状変化について調査した。その結果、圧裂係数や高温カンタブロ損失率などの性状に対する中温化の影響は小さく、それらの性状は新規アスファルト混合物と同等であると考えられた。また、促進劣化による再生中温化アスファルト混合物の性状変化も新規の混合物と同程度である可能性が示唆された。また、屋内でアスファルト混合物を作製する際に発生するアスファルトフェーム量を測定し、作業員の暴露量に対する安全評価を行った。その結果、作業内容によっては粒子状物質が多く捕捉されやすいが、アスファルトフェームに相当する溶剤可溶分は規定濃度以下であることが明らかとなった。

建設発生土の発生源の環境安全性評価においては、長期的な溶出特性を短時間で再現(評価)できる室内試験が確立されていないため、元素の種別に応じた評価方法の開発や、盛土と埋土の酸化還元環境の違いによる利用

形態に応じた、低コストなリスク評価方法の提案が必要である。

岩石からの長期的な重金属等の溶出の実態を把握するため、土研式雨水曝露試験結果を用いた元素ごとの溶出パターンの特徴を分析するとともに、土研式雨水曝露試験による長期溶出特性評価の妥当性を検証するため、実大盛土と土研式雨水曝露試験の浸出水濃度を比較し、土研式雨水曝露試験の濃度により、実現現象を概ね適切に評価できることを確認した。

還元環境を想定した室内溶出試験法として、脱気水や、より還元的な水素水溶液を用いた溶出試験や連続溶出試験を開発し、これらをヒ素・ホウ素を含む泥岩に適用して、酸化還元電位の違いによる溶出試験結果の比較を実施した。その結果、本試験に用いた泥岩ずりは酸化還元電位が低下するとヒ素、ホウ素ともに積算溶出量が増加すること、および水素水による連続溶出試験では、酸化還元電位が概ね 400 mV から 100 mV まで低下し、かつ、ヒ素、ホウ素の初期積算溶出量も最大値を示すなど、開発した試験方法が、還元環境を再現する試験方法として有効であるなどの知見を得た。さらに、往復振とうと攪拌翼による繰返し溶出試験の比較実験を行ったところ、往復振とうによる粒子の細片化と溶出濃度の増加が認められたことから、攪拌翼による溶出操作が、往復振とうに比べてより実現現象に近い試験方法であることを示した。

建設発生土の利用技術としては、元素の違いによる発生土のタイプや、酸化還元環境が異なる利用形態に応じたリスク評価方法の提案、低コストな重金属汚染対策手法の提案を目標とし、ヒ素・ホウ素を含む蒸留水、脱気水および水素水を用いたバッチ吸着試験を実施した。その結果、酸化還元電位が概ね 400 mV から 250 mV まで低下すると、天然材料へのヒ素の吸着性能が低下し、ホウ素の吸着性能が向上することを確認した。また、吸着層工法に関する設計上の課題である、盛土内での水の流れに関して文献調査を実施から、課題解決の可能性がある工法を見いだすとともに、一般的に適用されている吸着層工法に関して、盛土中の水の流れに着目したシミュレーションモデルを作成した。さらに、酸性化を伴う建設発生土の処理を想定し、重金属を含む酸性水を用いて、カルシウム系中和剤と鉄系吸着剤を併用した吸着試験を実施した結果、ヒ素・セレン・鉛の吸着効果を確認し、多元素の濃度パターンの解析から、盛土内の透水性・水の流れへの影響が懸念される沈殿物の生成条件に関する知見を得た。

RESEARCH AND DEVELOPMENT ON CONSTRUCTION TECHNOLOGY IN ORDER TO REALIZE SUSTAINABLE CONSTRUCTION RECYCLING

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Materials and Resources Research Group
NISHIZAKI Itaru

Research Group : Geology and Geotechnical Engineering Research Group (Geology Research)
Road Technology Research Group (Pavement Research)
Materials and Resources Research Group
Cold-Region Construction Engineering Research Group (Geological Hazards Research)
Cold-Region Maintenance Engineering Research Group (Materials Research)

Abstract : It is expected to promote utilization of construction byproducts in order to realize sustainable society. We conduct research and development focusing on utilization of construction byproducts such as concrete recycled aggregate, asphalt recycled aggregate, and construction waste soil containing heavy metal derived from natural. The following two goals of this program are

- (1) Development on the technology to achieve utilization of construction byproducts for different purposes in accordance to the use.
- (2) Development on the technology for the evaluation and improvement of environmental safety for the use of construction byproducts.

Until 2020, we conducted the research on the influence upon ASR resistance performance, freezing and thawing resistance performance and drying shrinkage of recycled aggregate concrete, and a guideline for the utilization of recycled aggregate concrete to precast concrete was written based on these results. We also conducted the research on the performance evaluation of asphalt mixture with increasing repletion of recycling, and evaluated the amount of asphalt fume during producing asphalt mixture that may affect workers. Reliable evaluation and utilization methods of construction waste soil containing heavy metal derived from natural were studied as the countermeasures to improve environmental safety including the PWRI exposure test method and some extraction methods.

Key words : recycled concrete aggregate, recycled asphalt aggregate, construction waste soil containing heavy metal derived from natural, environmental safety

9.1 適材適所のリサイクル材等利用技術の構築

9.1.1 リサイクル材料のコンクリート用骨材への利用技術の開発

担当チーム：材料資源研究グループ、
寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）
研究担当者：古賀裕久、安中新太郎、片平博、吉田行、
清野昌貴、野々村佳哲

【要旨】

再生骨材コンクリートの普及に向けた技術的課題について整理し、その解決策を提案すべく検討を行っている。これまで、再生骨材の使用が硬化コンクリートの品質に与える影響として、アルカリ骨材反応（ASR）、塩分環境下の耐凍害性、乾燥収縮による寸法変化等に関して検討を行ってきた。令和元年度は、再生粗骨材 M の耐凍害性評価試験方法の合理化、再生粗骨材の品質変動の影響把握および収縮低減剤の効果の確認等を行った。さらに、平成 30 年より、東北技術事務所、宮城大学と共同研究を行っており、その成果として「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係わるガイドライン（案）」を作成した。

キーワード：再生骨材、アルカリ骨材反応、スケーリング、乾燥収縮、プレキャストコンクリート

1. はじめに

廃棄されるコンクリート塊の再資源化率は平成 24 年度で既に 99.3%に達し、高い水準を維持しているものの、利用用途の大半が路盤材である。大都市圏では、廃棄量の増大に対して路盤材の需要に限界があるため、今後、コンクリート塊の再資源化率の低下や再資源化の停滞に伴う解体工事の遅れが懸念される。このため、コンクリート塊の新たな有効利用技術の開発は喫緊の課題であり、コンクリート用骨材（再生骨材）への利用促進が望まれている。

再生骨材の規格は、その品質を H、M、L の 3 ランクに分けた JIS が 2005～2007 年に制定された。H は付着モルタルをできる限り取り除き、原骨材に近い状態としたもので、普通骨材と同様に使用できるが、副産物としての微粉が大量に発生するという課題もある。M と L は多少の付着モルタルを許容することで、原コンクリートのより多くの部分を再生骨材として利用できるが、利用用途が限定されており、L は構造体には利用できない。M は乾燥収縮の影響の少ない地下構造物やプレキャスト製品に利用できる。また、2012 年の改正で M には耐凍害性が制定され、利用用途の拡大が図られている。国土交通省においては、平成 28 年 3 月に「コンクリート副産物の再利用に関する用途別品質基準」（以下、用途別品質基準という）が通知され、再生骨材コンクリート M の普及

に向けた環境整備が進みつつある。

一方で課題もある。再生骨材コンクリート M における現状のアルカリ骨材反応（以下、ASR という）抑制対策が煩雑であること、凍結防止剤散布地域等で塩分の影響を受ける場合の耐凍害性が明らかでないこと、コンクリートの乾燥収縮が大きくなること等である。また、再生骨材を普通骨材に混合して使用した場合の影響や、再生細骨材の利用に関する知見が少ない等の課題もある。これらの課題を解決し、適材適所の観点から再生骨材コンクリートの適用範囲を明らかにすることが本研究の目的である。

本研究は材料資源研究グループ（つくば）と耐寒材料チーム（寒地）とで表-1 に示すような分担で研究を進めている。なお、寒冷地の塩分環境下におけるプレキャストコンクリートへの再生骨材の利用に関しては、平成 30

表-1 主な研究課題と分担

課題	H28	H29	H30	R1	主な担当、特筆事項
ASR対策	○	○	○		材料資源研究G
塩分環境下の耐凍害性	○		○	○	材料資源研究G、耐寒材料T
乾燥収縮	○	○	○	○	耐寒材料T
再生細骨材の品質試験		○			材料資源研究G
プレキャストコンクリートへの有効利用			○	○	材料資源研究G、耐寒材料T、H30.3に東北技術事務所、宮城大学と共同研究を締結

年3月に、東北技術事務所、宮城大学と共同研究を締結して、検討を進めてきた。令和元年度は、その成果として「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材Mの有効利用に係わるガイドライン(案)」(以下、ガイドライン案という)をとりまとめた。

本報告は以下の構成で記載する。

- 2章：平成28～30年度の研究概要
- 3章：令和元年度の研究内容
- 4章：ガイドライン案
- 5章：まとめ

2. 平成28～30年度の研究概要

2.1 ASR抑制対策の検討

再生骨材コンクリートのASR抑制対策に関しては、再生骨材中に含まれる旧ペースト中のアルカリの影響を考慮し、普通コンクリートよりも厳しい抑制対策が示されている。この厳しい基準が再生骨材コンクリート普及の足枷となっている可能性がある。そこで、旧ペーストがASR反応性に与える影響を確認する実験を行った¹⁾。

製造後13年を経過し、ASRによるひび割れが発生しているコンクリートを原材料として、それを破碎して再生骨材を製造した。また、同じ原材料を可能な限り研磨して原骨材を採取した。これらの材料を用いて、再生骨材コンクリートと普通コンクリートを製造し、ASR促進試験を実施した。その結果、再生骨材コンクリートと普通コンクリートの膨張量に有意な差は生じなかった。

2.2 塩分環境下の耐凍害性

凍結防止剤散布地域等の塩分の影響を受ける地域では凍害の一種であるスケーリング劣化が促進される。このスケーリング劣化については、普通骨材を用いたコンクリートの場合でも十分な知見があるとは言えず、再生骨材を用いた場合にはさらに知見が無いのが現状である。そこで、再生粗骨材を用いたコンクリートの塩分環境下における凍結融解抵抗性について検討した²⁾。

実験はJIS A 1148(A法)に準拠して、容器内に塩水を入れた試験を実施した。内部劣化(相対動弾性係数の低下)については、淡水を用いた場合と差が無く、塩分の影響は明確でなかった。スケーリング劣化(質量減少率)については、淡水を用いた場合よりも明確にスケーリング量が多くなり、塩分によって劣化が促進することが確認された。

再生粗骨材を使用する際には、内部劣化については、JISに規定される耐凍害品の再生粗骨材Mを用いることで対策できる。また、スケーリング劣化についてはスケー

リングがある程度の深さまで進行するまでは再生粗骨材の品質の影響は生じにくいことが分かった。

2.3 乾燥収縮

再生骨材は、骨材中に含まれるコンクリートの旧ペースト分の影響を受けるため、天然の骨材に比べて吸水率が大きい。吸水率が大きい再生骨材をコンクリートに用いると、乾燥収縮量が大きくなるとされている。そのため、再生骨材を使用したコンクリートでは、乾燥収縮によりひび割れが発生するリスクが大きくなることが懸念される。

このため、再生粗骨材M、Lを用いたコンクリートによる乾燥収縮試験を行い、比較検討を行った。その結果、旧モルタルの量や質の影響により、再生粗骨材を用いることで乾燥収縮量が增大することや、旧ペースト分が保持する水分の影響により長さ変化率の増大するタイミングが普通骨材に比べて遅くなる傾向などを確認した。

さらに既往文献の調査を行い、骨材中の内在水量が多くなるほど、乾燥収縮が大きくなる傾向を確認した。

また、再生粗骨材と普通粗骨材とを混合使用した場合、乾燥収縮による長さ変化率は、再生骨材の混合割合と比例することを確認した。そのため、特性が明らかな普通骨材と混合使用することで、乾燥収縮への対応策の1つとできることを確認した。

2.4 再生細骨材の品質試験

コンクリート用細骨材の密度および吸水率試験方法はJIS A 1109に規定されているフローコーン法で行われる。フローコーン法は、微粒分の少ない川砂を対象に開発された試験法であり、未洗浄の再生細骨材のように微粒分の多い細骨材では表乾状態が正しく判定されない可能性がある。そこで、再生細骨材の表乾状態を、フローコーン法で適切に判定できるか否かについて検討した³⁾。

測定方法には、フローコーン法の他に人的誤差の入りにくい方法として土木学会規準JSCE-C 506(電気抵抗によるコンクリート用スラグ細骨材の密度および吸水率試験方法(案))による方法を実施し、双方の結果を比較することで、フローコーン法の適用性を検討した。その結果、微粒分を多く含む再生細骨材であっても、微粒分を除去せずにフローコーン法によって表乾状態を判定できることが分かった。

3. 令和元年度の研究内容

3.1 再生粗骨材Mの耐凍害性評価試験方法の合理化

再生粗骨材Mにおける耐凍害性の評価試験方法は土木研究所で提案され、JIS A 5022「再生骨材コンクリート

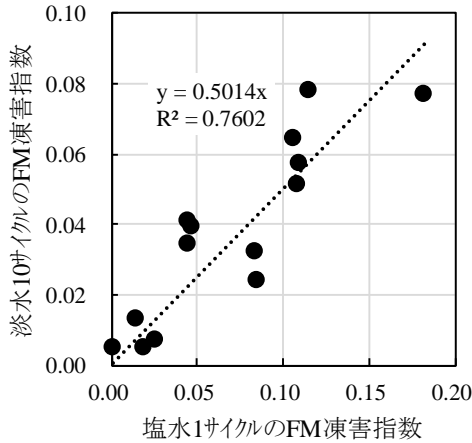


図-1 淡水の試験と塩水の試験の比較

表-2 再生粗骨材の凍結融解試験方法（簡易法）

JIS A 5022 附属書 D に示される試験方法との相違点		
	JIS A5022 附属書 D	提案する簡易法
容器中の溶液	淡水	塩水（3%NaCl）
凍結融解回数	10 サイクル	1 サイクル
上記以外	—	JIS A 5022 に従う

M」の附属書 D に示されている。この試験方法は、再生粗骨材試料をプラスチック製容器に入れて水で満たし、冷凍庫 (-18℃以下) と水槽 (20℃) の間を 1 日 1 サイクルで、10 回の凍結融解作用を与えるもので、試験前後の粗粒率の変化量 (FM 凍害指数) が 0.08 以下のものを耐凍害品と判定する。すなわち 10 日間以上の試験期間を要し、試験期間の短縮が望まれている。そこで、容器に入れる溶液を淡水から塩水 (3%NaCl 溶液) に変えることで試験期間の短縮を試みた⁴⁾。

10 種類の再生粗骨材 M を対象に、計 14 回の試料採取を行い、2010 の粒度に対して淡水 10 サイクルの試験と塩水 1 サイクルの試験を実施し、その結果を比較した。

結果を図-1 に示すが、良い相関関係が得られた。この結果から、表-2 に示す簡易法を提案した。この簡易法を用いる場合の FM 凍害指数の判定基準としては、現時点では 0.15 程度以下を目安とするのが良いと考えられる。

3.2 再生粗骨材の品質変動の検討

再生クラッシュランを製造している工場から、約半年間にわたり、2 週間に 1 回程度の割合で再生クラッシュラン RC40 を 10 回採取した。採取したクラッシュランを 25mm および 5mm のふるいにかかけ、2505 の粒子を採取し、これを再生粗骨材 L とした。次に、この再生骨材 L をロサンゼルス試験機にかけて一定時間研磨し、これを 5mm ふるいにかけることで 5mm 未満の粒子を排除し、

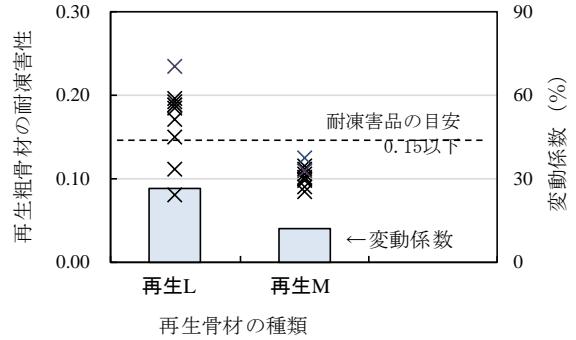


図-2 再生粗骨材の耐凍害性

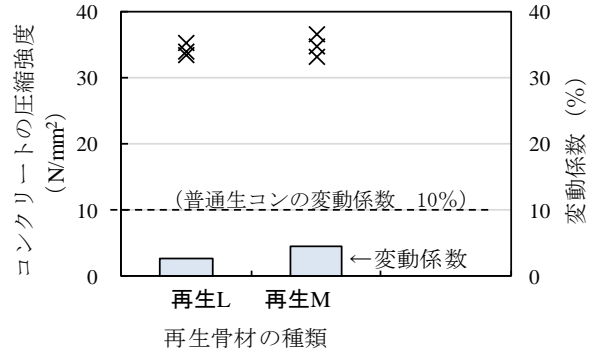


図-3 圧縮強度

洗浄したものを再生粗骨材 M とした。

これらの再生粗骨材の品質 (密度、吸水、耐凍害性等) を測定し、品質変動の程度を調べた。また、各 10 種類の再生粗骨材から品質のレベルの上・中・下の骨材を選定し、これらを用いて再生骨材コンクリート (水セメント比 55%、細骨材率 46%、空気量 4.5%、細骨材には川砂を使用) を製造し、圧縮強度 (σ_{28}) の変動幅を調べた。

骨材物性のうちの耐凍害性試験 (3.1 参照) の結果を図-2 に示す。再生 L の品質は大きく変動したが、再生 M の品質の変動幅は小さく、安定した結果が得られた。圧縮強度試験結果を図-3 に示す。データが 3 点しかないが、変動係数はレディーミクストコンクリートの配合設計に多く用いられる 10% に比較して、小さな変動幅となった。

3.3 5mm 未満の骨材量が強度や耐久性に及ぼす影響

コンクリート塊を破砕・分級して製造された再生骨材のうち、粒径 5mm 未満の骨材では旧ペースト分が多く含まれており、5mm 以上の粒径の再生粗骨材に比べて吸水率が大きくなる⁵⁾。一方、再生粗骨材に関する JIS では粒度区分に応じて 5~15% を上限とし、粒径 5mm 未満の骨材を含むことが許容されている。また、再生骨材の管理指標の 1 つである吸水率試験は、粒径 5mm 以上の骨材を対象として試験を行うことが規定されている。

そのため、同じ吸水率の再生粗骨材であっても、粒径

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

再生粗骨材	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/Ckg)	AE 剤 (%Ckg)	SL (cm)	Air (%)
				W	C	S	G				
L10	BB	55	46	160	291	854	904	2.0	0.0013	9.8	5.0
L0	BB	55	46	160	291	854	904	1.7	0.0020	14.1	5.0

表-4 各試験結果

規格	項目	材齢等	L10	L0	L10/L0
JIS A 1108	圧縮強度 (N/mm ²)	28 日	24.3	23.7	103%
		91 日	36.3	37.5	97%
JIS A 1149	静弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)	28 日	26.9	27.9	97%
		91 日	26.9	27.9	96%
JIS A 1129-1	乾燥収縮 (μ)	6ヶ月	725	709	102%
JIS A 1152	中性化速度係数 (mm/√週)	6ヶ月	5.5	5.1	108%
JIS A 1148	耐久性指数 (-)	-	18	18	100%
ASTM C 672	スケーリング量 (kg/m ²)	50 cyc	0.31	0.34	91%
JSCE G 572	塩化物イオンの見掛け拡散係数 (cm ² /年)	1年	1.16	1.41	82%

5mm 未満の骨材量が多い場合には、コンクリートの品質が悪くなることが懸念される。そこで、粒径 5mm 未満の骨材を、粒度 2005 の上限値である 10%程度含む再生粗骨材 L10 と、5mm 未満の粒子をふるいで除外した再生粗骨材 L0 とでコンクリートを作成し、両者を比較した。なお、再生粗骨材の吸水率は、粒径 5mm 以上の骨材が試験対象のため L10、L0 とともに 5.65%であり、同様に、絶乾密度は 2.28g/cm³であった。また、粒径 5mm 未満を細骨材の試験方法により測定した結果、吸水率は 12.32%、絶乾密度は 1.98g/cm³であった。

表-3 に配合およびフレッシュ性状を示す。なお、セメントは高炉 B 種、細骨材には普通骨材（陸砂、吸水率 1.41%、絶乾密度 2.61g/cm³）を使用した。

表-4 に各試験結果を示す。5mm 未満の粒径の骨材の有無に関わらず、強度性状、乾燥収縮、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、塩分浸透抵抗性は同程度の結果となり、粒径 5mm 未満の骨材の影響は小さいことが確認できた。

3.4 混和剤による乾燥収縮対策の検討

乾燥収縮対策の 1 つとして収縮低減剤の使用があるが、再生骨材、収縮低減剤ともに、その使用により耐凍害性が低下する場合があるとされている。そこで、再生骨材自身の耐凍害性が規格値付近である材料を用いて、

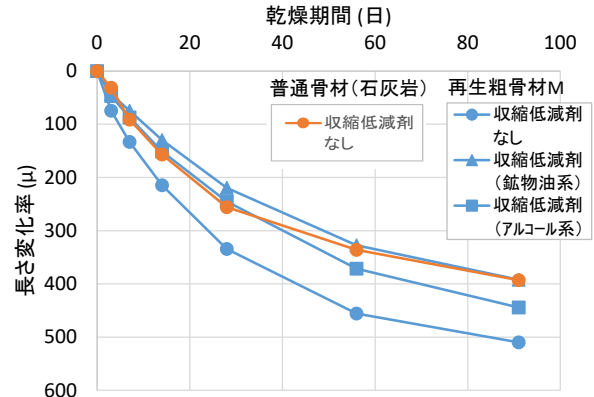


図-4 乾燥収縮試験結果 (JIS A 1129-1)

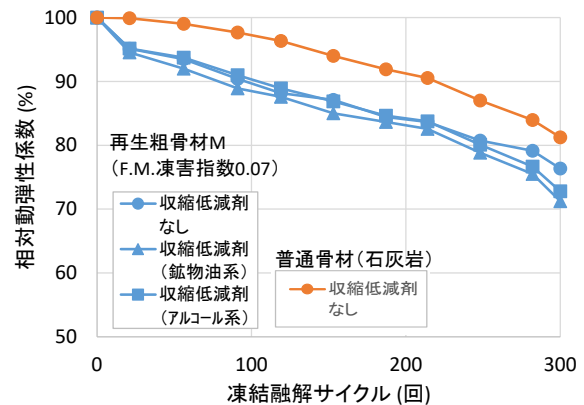


図-5 凍結融解試験結果 (JIS A 1148)

収縮低減効果と耐凍害性への影響を確認した。

粗骨材には FM 凍害指数 0.07 で耐凍害性が確認された再生骨材 M (吸水率 3.20%、絶乾密度 2.46g/cm³) を使用した。収縮低減剤には、鉱物油系とアルコール系の 2 種類を用い、消泡剤と AE 剤を適切に組み合わせることで微細な空気を適切に混入することで、耐凍害性を確保することとした⁹⁾。実験では、収縮低減剤の有無での比較や、普通粗骨材（石灰岩碎石）との比較を行った。なお、セメントは高炉 B 種、細骨材は陸砂を使用し、水セメント比 55%、細骨材率 45%とした。また、目標空気量 5.0%とし、各配合 4.8~5.4%の空気量が得られた。

図-4 に乾燥収縮試験結果を示す。収縮低減剤を用いることで乾燥収縮量が 15~25%程度低減し、特に、鉱物油系の収縮低減剤では普通骨材と同等程度となった。

図-5 に凍結融解試験結果を示す。再生粗骨材と収縮低減剤を用いた配合であっても、十分な耐凍害性が得られることが確認できた。

4. ガイドライン案

4.1 ガイドライン策定に至るまでの経緯

国土交通省においては用途別品質基準が平成 28 年 3

月に通知されるなど、再生骨材コンクリートの利用促進に向けた規準類の整備が進んでいるが、再生骨材コンクリートの利用は、現状では十分に広がっていない。この理由として、解体工事に伴うコンクリート塊等の発生と、その再利用のマッチングが容易ではないこと、レディーミクストコンクリート工場等では資材をストックしておくスペースに余裕がない場合も多く、再生骨材コンクリートを出荷するために再生骨材をストックしておくことは困難であること、などが挙げられる。

一方、プレキャストコンクリート工場の場合は、再生骨材コンクリートを製品化した上でストックしておくこと、製品をより遠方に輸送することが可能になり、再利用の時間、地理的距離による困難さを一部緩和できると期待される。特に、道路側溝や縁石等の簡易なプレキャ

ストコンクリート製品への利用は有力な普及用途である。しかし、この用途別品質基準の中では、塩害地域および凍結防止剤が散布される箇所は、再生骨材の使用が耐久性に与える影響に不明な点が残されているとして、標準的な使用範囲に含まれていない。一方で、スパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量は増大しており、再生骨材コンクリートの普及の足枷となっている。

東北地方整備局では、副産物の有効利用に関する意識が高く、再生骨材や溶融スラグ骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の利用促進に向けたガイドライン等の整備を進めてきた。また、再生骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の暴露試験を実施するなど、耐凍害性についてのデータを蓄積しつつあった。

そこで、土木研究所は、上記の知見を有する東北地方

表-5 プレキャストコンクリートへの再生粗骨材 M の有効利用に係わるガイドライン(案)の概要

第1章 総則	
1.1 目的	本ガイドライン(案)は、東北地方において、プレキャストコンクリート製品への再生粗骨材Mの有効利用を促進することを目的として策定したものである。
1.2 適用範囲	(1)本ガイドライン(案)は、塩害地域および凍結防止剤散布地域を含む東北地方において、再生粗骨材Mをプレキャストコンクリート製品に適用する場合に適用する。 (2)プレキャストコンクリート製品の範囲は、1.3に示すものとする。 (3)使用する再生粗骨材Mの品質および品質管理方法は、第2章によるものとする (4)再生骨材コンクリートの配合および製造上の留意点は、第3章によるものとする
1.3 本ガイドライン(案)で想定するプレキャストコンクリート製品の範囲	本ガイドライン(案)で想定するプレキャストコンクリート製品の範囲は、以下の全ての条件を満足するものとする。 ・無筋または鉄筋コンクリート構造の製品。 ・コンクリートの設計基準強度が30N/mm ² 以下の製品。 ・乾燥収縮による不具合が生じない寸法形状の製品。 ・有スランブのAEコンクリートが使用された製品
1.4 再生骨材の使用割合	(1)プレキャストコンクリート製品に使用される粗骨材の全容積に占める再生粗骨材Mの容積混合率を20%以上とすることを推奨する。
第2章 再生粗骨材	
2.1 使用可能な再生粗骨材	(1)プレキャストコンクリート製品に使用する再生粗骨材は、JIS A 5022「再生骨材コンクリートM」の附属書A「コンクリート用再生骨材M」に規定される再生粗骨材Mの品質を満足するものとする。 (2)使用する再生粗骨材の最大寸法は20mm以下を標準とする。
2.2 品質管理および検査	(1)再生粗骨材Mの品質管理項目、試験方法および検査方法はJIS A 5022「再生骨材コンクリートM」の附属書A「コンクリート用再生骨材M」に準拠し、適切に実施することとする。また、JIS A 5022附属書Aに示される品質基準に合格したものを使用する。 (2)品質管理および検査の頻度は適切に設定する。
2.3 再生粗骨材の貯蔵	再生粗骨材Mは、粒度分布や含水率を適切に保ち、かつ、他の骨材と混ざらないようにしうえて、適切に貯蔵しなければならない。
第3章 再生骨材コンクリートの配合および製造上の留意点	
3.1 一般	再生粗骨材Mを用いたプレキャストコンクリートは、3.2～3.4の事項を除いては、通常のプレキャストコンクリート製品と同様にJIS A 5364に従って製造することを標準とする。
3.2 アルカリシリカ反応抑制対策	アルカリシリカ反応抑制対策は、JIS A 5022 附属書Cに従って行う。
3.3 配合強度の設定	再生骨材コンクリートの配合強度は、普通骨材を使用する場合と同等以上とする。また、圧縮強度の変動係数は適切に設定する。
3.4 空気量	フレッシュコンクリートの空気量を圧力法で測定する場合には、骨材修正係数を測定し、補正する。

表-6 ガイドライン案に掲載した技術資料

1. 塩分環境下における凍結融解抵抗性
2. 再生粗骨材の凍結融解試験方法(簡易用)
3. 塩分浸透抵抗性
4. 中性化抵抗性
5. 圧縮強度
6. 大型プレキャスト製品の暴露試験の例
7. 再生骨材の品質変動に関する検討
8. 東北地方整備局管内における暴露試験

整備局東北技術事務所、宮城大学と平成30年1月に共同研究を締結し、塩害地域や凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートMの耐久性等に関して総合的な検討を行った。この結果、プレキャストコンクリート製品への使用が可能と判断したので、コンクリート解体材の利用促進の観点からガイドライン(案)を策定した。

4.2 ガイドライン(案)の概要

作成したガイドライン(案)の概要を表-5に示す。この表には条文のみを掲載しているが、実際のガイドライン(案)には解説を設け、更に詳述している。塩分環境下の耐凍害性については、すでに前章までに紹介した研究成果や共同研究者が有する暴露試験の結果などから、厳しい環境でも従来と同様の耐久性を有する再生骨材コンクリートMの条件について記述している。

この他にも、圧縮強度や乾燥収縮への影響を考慮してプレキャストコンクリート製品の範囲を1.3で示している。なお、現状で検証ができていないものは有スランプコンクリートであり、硬練コンクリートを振動・加圧締めする方法や、遠心力締めで成形する製品は、現時点では対象外とした。

アルカリシリカ反応抑制対策は、条文ではJIS A 5022 付属書Cに従うとしたが、JIS A 5022の内容は複雑であること、想定するコンクリート製品の配合がある程度想定できることから、解説において以下に示す抑制対策の例を示した。

・普通ポルトランドセメントを使用し、単位セメント量が400kg/m³以下の場合には再生粗骨材Mを全粗骨材容積の25%まで使用してよい。

・高炉セメントB種等の混合セメントを使用し、単位セメント量が400kg/m³以下の場合には、粗骨材の全てを再生粗骨材Mとしてよい。

なお、本ガイドライン(案)策定にあたって整理した知見を、技術資料として巻末に紹介した(表-6)。

5. まとめ

- (1) 再生粗骨材Mの耐凍害性評価試験方法の合理化について検討した。容器に入れる溶液を淡水から塩水に変えることで、凍結融解サイクルを10サイクルから1サイクルに減らせることが分かり、簡易試験方法を提案した。
- (2) 再生粗骨材の品質変動について検討した。この結果、再生粗骨材の品質がMクラスであれば、再生粗骨材の耐凍害性の変動は比較的小さいこと、圧縮強度の変動も小さいことなどが分かった。
- (3) 再生粗骨材Lについて、粒径5mm未満の骨材の量がコンクリートの強度や耐久性等に及ぼす影響を検討した。この結果、JISの粒度分布の範囲内であれば、強度性状、乾燥収縮、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、塩分浸透抵抗性に及ぼす影響は小さいことを確認した。
- (4) 再生骨材と収縮低減剤の組み合わせについて検討した。この結果、再生骨材の乾燥収縮対策として、収縮低減剤の有効性が確認できた。
- (5) 東北技術事務所等との共同研究により、「プレキャストコンクリートへの再生粗骨材Mの有効利用に係わるガイドライン(案)」を作成した。

参考文献

- 1) 古賀裕久、片平博:再生骨材コンクリートと普通コンクリートのアルカリシリカ反応促進試験における膨張量の比較、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.20、2020.10(投稿中)
- 2) 片平博、古賀裕久:再生粗骨材を用いたコンクリートの塩分環境下における凍結融解抵抗性に関する研究、第74回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-348、2019.9
- 3) 片平博、古賀裕久:再生細骨材の密度および吸水率試験方法に関する研究、第73回土木学会年次学術講演会講演概要集、pp.577-578、2018.8
- 4) 片平博、古賀裕久:再生粗骨材の凍結融解試験方法(簡易法)の提案、第75回土木学会年次学術講演会講演概要集、2020.9(投稿中)
- 5) 野々村佳哲、清野昌貴、吉田行、安中新太郎:再生路盤材のコンクリート用骨材としての適用性に関する検討、寒地土木研究所月報、第774号、2017.11
- 6) 吉田行、安中新太郎:種々の収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と耐凍害性、北海道開発技術研究発表会、第62回、2019.

9.1 適材適所のリサイクル材等の利活用技術の構築

9.1.2 循環型社会に向けた舗装リサイクル技術に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装チーム）、iMaRRC、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）

研究担当者：藪雅行（上席）、川上篤史、新田弘之（上席）、川島陽子、丸山記美雄（上席）、金谷元、上野千草

【要旨】

本研究は、アスファルトコンクリート塊の高い再資源化率を持続的に維持していくため、繰り返し利用された再生骨材（低品位リサイクル材）の影響の懸念および積雪寒冷地での課題に対して、再生骨材・混合物の品質に応じた適用条件等を明らかにすることを目的としている。

令和元年度までに、組成の異なる再生用添加剤を用いてアスファルト混合物の繰返し再生による影響を把握するため、室内においてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。また、積雪寒冷地における再生骨材および再生混合物の性状について、舗装工事箇所より採取した試料に対して評価を行うとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料および歩道用路盤材料としての適用性について検証を行った。それらの結果について報告する。

キーワード：再生アスファルト混合物、再生用添加剤、繰返し再生、圧裂係数、凍上抑制層

1. はじめに

日本のアスファルト混合物の再生利用は40年以上の歴史があり、近年は再生骨材配合率が年々上昇してきていることから、今後は繰返し再生された骨材を含むアスファルト混合物が増えるものと考えられる。実際に、平成30年度の統計リでは、再生アスファルト混合物中の再生骨材配合率は全国平均で約51%、関東地方61%である。特に都市域の一部地域では、配合率が80%以上など高い水準となっている。高い再生骨材配合率は、繰返し再生利用時の再生アスファルトの性状への影響が大きいと考えられ、再生アスファルトの性状低下による舗装寿命の短縮が懸念される。一方、積雪寒冷地においては、寒冷地用アスファルトの繰返し再生利用による再生混合物の品質低下が懸念されている。特に、地方部では効率の高いリサイクルプラントが導入されていない地域があり、アスファルト塊の再生混合物としての再利用量が抑制され、再生混合物以外への利用拡大が期待されている。

本研究は、アスファルトコンクリート塊の高い再資源化率を持続的に維持していくため、繰り返し利用された再生骨材（低品位リサイクル材）の影響の懸念および積雪寒冷地での課題に対して、再生骨材・混合物の品質に応じた適用条件等を明らかにすることを目的としている。

令和元年度までに、アスファルト混合物の繰返し再生による影響を把握するため、室内において組成の異なる再生用添加剤を用いてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。また、積雪寒冷地における再生骨材および再生混合物の性状について、舗装工事箇所より採取した試料に対して評価を行うとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料および歩道用路盤材料としての適用性について検証を行った。

2. 低品位リサイクル材等の適用条件の明確化

2.1 概要

繰返し劣化・再生したアスファルトおよび混合物の性状を把握するため、実験室内においてアスファルトおよび混合物を劣化させた後、成分の異なる再生用添加剤によりアスファルトの針入度を回復させ、それを複数回繰返しその影響を分析した。本研究では、①添加剤の成分差異による影響を最大限にするため再生にあたって新アスファルトを全く使用しない、100%再生による検討（以下、「添加剤の成分差異による影響把握」と）、②新アスファルトおよび新規骨材を再生混合物に追加することによる影響の把握（以下、「配合率の差異による影響把握」）について

検討を行った。

2.2 研究方法

2.2.1 試験手順

新規のアスファルト（以下、ORG）や新規混合物を試験室内で促進劣化させた後、成分の異なる再生用添加剤等（以下、添加剤）を加えて再生することを繰り返し、各段階において各種性状変化を把握した。

(1) 添加剤の成分差異による影響把握（100%再生）

アスファルトの劣化・再生試験手順は図-1 に示すように試験項目により 2 種類（図中①、②）の方法で行った。まず、①の方法としてORGを促進劣化試験により針入度 20 程度にし、この劣化アスファルトを添加剤により針入度 70 に再生してこれを 5 回繰り返した（以下、繰り返し再生試験）。アスファルトの促進劣化は、舗装調査・試験法便覧²⁾A046 および A059 に示される薄膜加熱試験（以下、TFOT）および加圧劣化試験（以下、PAV）によって劣化させた。ただし、PAV においては劣化後の針入度を 20 程度とさせるために、劣化時間をORGの針入度が 20 となった 54 時間に変更した。また、混合物はORGと劣化・再生を 3 回および 5 回繰り返した再生アスファルト（以下、n 回繰り返し劣化・再生したものを劣化 n、再生 n と示す）をそのままバインダとして用いて作製し、混合物性状に関する試験を行った。

一方、②の方法として、1 回で非常に低い針入度になるまで劣化させ再生する方法で試料を作製した（以下、低針入度再生試験）。これは、繰り返し再生試験の省力化を図るために行ったもので、PAV 時間を 288 時間に設定することで針入度を 5 になるまで劣化させて低針入度アスファルトを作製し、針入度 70 になるように添加剤を加えて再生を行った。なお、この低針入度再生試験は繰り返し再生試験の 3 回相当の性状になり³⁾、試料はWT疲労試験に用いる再生アスファルトに適用した。

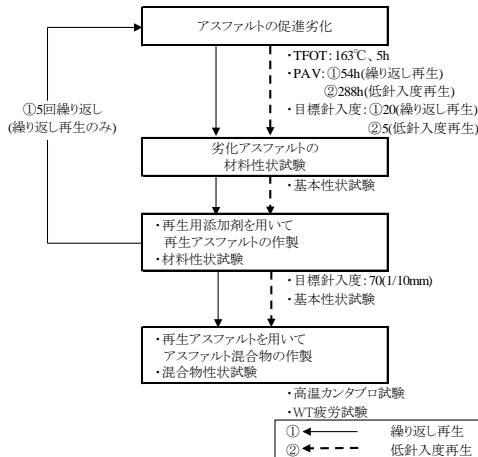


図-1 試験手順（100%再生）

(2) 配合率の差異による影響把握

再生骨材配合率（以下、R 率）100、80、60%および成分の異なる添加剤により混合物の繰り返し再生を行い、混合物性状の変化を把握した。なお、R 率 100%の再生混合物の試験は、「添加剤の成分差異による影響把握」のとおりである。R 率 80%の再生混合物（以下、80%再生）の試験手順を図-2 に示す。混合物は密粒度混合物(13)とした。再生骨材は、新規混合物を製造したのち熱風循環乾燥炉において劣化させて用いた。劣化時間は針入度 20 になるよう事前に検討し設定した。再生混合物は、再生骨材のアスファルトを抽出・回収して針入度を計測し、目標針入度が 70 になるよう添加剤を加え、20%分の新規骨材の追加およびORGの添加量を調整して作製した。添加剤は、後に示す芳香族分が多い添加剤 A および飽和分が比較的多い C を用いた。この手順を 7 回繰り返した。

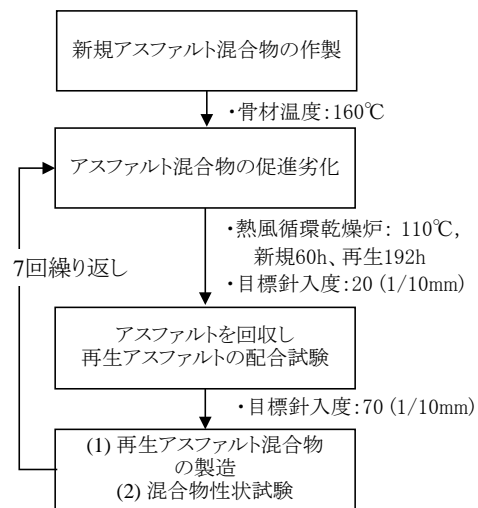


図-2 試験手順（60 および 80%再生）

2.2.2 試験材料の性状

アスファルト（ORG）は表-1 に示す、舗装用石油アスファルト 60/80 を用いた。添加剤は、成分の異なる 5 種類のものを使用した。添加剤の性状を表-2 に示す。添加剤 A および B は芳香族分が約 90%のものであり、添加剤 C と D は芳香族分と飽和分が約 50%ずつ含むものである。添加剤 E は、再生用添加剤として使用されているものではないが、再生用添加剤と同じ原料から製造されたオイルで、ほぼ飽和分のみのものであり、比較用として使用した。なお、再生用添加剤 A~D は、オイルに適用される PCA（多環芳香族成分）規制に対応したのものを用いた。

混合物の基本配合を表-3 に示す。最大粒径 13mm の密

粒度アスファルト混合物で、最適アスファルト量は 5.5% である。本研究では、100%再生時はアスファルトのみを繰り返し劣化・再生し、混合物作製時に再生アスファルトを新規骨材に添加した。60 および 80%再生では、新規混合物を熱風循環乾燥炉において劣化させ、これを再生骨材として、40%もしくは 20%分の新アスファルトおよび新規骨材を同様の粒度で追加している。よって、粒度はどの再生回数においても同じである。しかし、添加剤の密度が異なるので、再生アスファルトの密度も ORG とは異なる。そのため、再生混合物の作製の際には、ORG の最適アスファルト量である 5.5%と同じ体積のアスファルト量になるように再生アスファルトの密度から補正して添加した。

表-1 ストレートアスファルト 60/80 (ORG) の性状

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

表-2 再生用添加剤の性状

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

表-3 アスファルト混合物の合成粒度 (密粒度アスファルト混合物)

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

2.2.3 試験方法

繰り返し劣化・再生を行ったアスファルトおよび混合物の性状は、表-4 に示す各種性状試験により評価した。試験方法は、舗装調査・試験法便覧²⁾等に記載があるものは、基本的にそれらに従って実施した。一般的な試験方法がな

いドライスラッジ量試験、小型曲げ試験および高温カンタプロ試験、ホイールトラッキング (WT) 疲労試験等は以下のように行った。

表-4 試験項目

試験項目	試験項目	試験法便覧
アスファルト性状試験	針入度試験	舗装調査・試験法便覧 A041
	軟化点試験	舗装調査・試験法便覧 A042
	伸度試験	舗装調査・試験法便覧 A043
	組成分析試験	JPI-5S-70-104 ⁴⁾
	ドライスラッジ試験	文献 5), 6) を参考にした方法
混合物性状試験	圧裂試験	舗装調査・試験法便覧 B006
	ホイールトラッキング試験	舗装調査・試験法便覧 B003
	小型曲げ試験	文献 7)
	高温カンタプロ試験	舗装調査・試験法便覧 B010
	WT 疲労試験	文献 8)
	曲げ疲労試験	舗装調査・試験法便覧 B018T

(1) ドライスラッジ量試験

アスファルトの再生時に再生用添加剤によっては、アスファルト内に粒子状物質が観察されることがあると既往研究⁵⁾で報告されている。そこで、この粒子状物質の量に関係すると考えられるドライスラッジ量を測定した。試験方法は重油中のドライスラッジ量を定量する試験である ISO-10307-1⁶⁾および既往研究⁵⁾を参考に表-5 に示す条件で測定を行った。なお、アスファルトをろ過するためには流動性を持たせるために希釈する必要があるが、予備試験により再生アスファルトのスラッジ量に影響を与えなかった添加剤 E を希釈剤として用いた。

表-5 ドライスラッジ量試験条件

再生 As : 添加剤 質量比	1 : 9
希釈剤	添加剤 E(飽和分 99.9%)
加熱温度(°C)	160
吸引温度(°C)	160
ろ過フィルター細孔径(μm)	1.6 (Whatman GF/A)
吸引圧(MPa)	絶対圧力で 0.04
混合方法	ガラス棒により攪拌

(2) 小型曲げ試験

アスファルト混合物の低温時の脆性を把握するため、小型曲げ試験を行った。試験方法は既存文献⁷⁾の方法で実施し、載荷速度は 10mm/min である。試験温度は、脆化点を得るための荷重のピークおよびひずみの変曲点の範囲内に入るよう、試験を行いながら設定した。

(3) 高温カンタブロ試験

混合物性状は、繰り返し再生により再生アスファルトの接着力が低下することが予想されたため、カンタブロ試験により評価することにした。カンタブロ試験ではこれまでの研究⁹⁾により供試体温度を上げていくと特に新規混合物と再生混合物の差が大きくなる傾向が見られたので、今回の実験でも供試体温度を 60℃にして行うカンタブロ試験（以下、高温カンタブロ試験と呼ぶ）を実施した。表-6 に高温カンタブロ試験条件を示す。

表-6 高温カンタブロ試験条件

供試体温度(℃)	60
ロサンゼルス試験機内温度(℃)	30
ドラム回転数	毎分 30 回転で 300 回転

(4) WT 疲労試験

舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験⁸⁾とされる WT 疲労試験を実施した。表-7 に WT 疲労試験条件、図-3 に WT 疲労試験の模式図を示す。WT 疲労試験は、厚さ 5cm のシリコンゴムの上に供試体を設置して、その上で車輪走行を行うものである。試験方法・条件は既往研究⁸⁾を参考に設定した。両試験ともに混合物種類は密粒度アスファルト(13)とし、同一の試料において 3 つの供試体からデータを取得して平均した値を試験結果として用いた。

表-7 WT 疲労試験条件

試験温度(℃)	40
走行速度(往復/min)	21
接地圧(MPa)	0.67
下層ゴム板硬度(JIS K6253 準拠)	15
供試体寸法(mm)	300×300×50
測定項目	車輪走行部のひび割れ率(%)
走行回数と測定条件	500 回毎測定

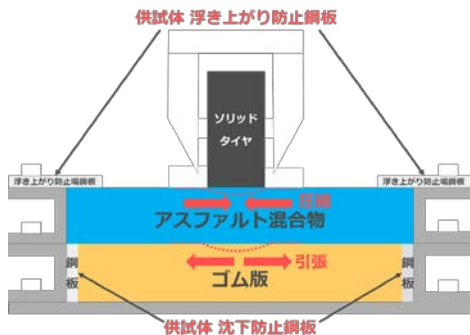


図-3 WT 疲労試験模式図

(5) 曲げ疲労試験

低温時の疲労破壊抵抗性として曲げ疲労試験を行った。

試験条件を表-8 に示す。曲げ疲労試験における破壊の定義として、複素弾性率が急激に低下したときとし、破壊回数 (N_{FE}) を算出した。また、新たな指標として Energy ratio (R_n)¹⁰⁾により破壊回数 (N_{FE}) を算出し N_{FE} と比較した。 R_n は下記式(1)より算出することができる。また、図-4 に示すとおり R_n は上に凸の放物線状になり、その最大値にあたる载荷回数が疲労破壊回数となる。多項式回帰曲線のフィッティングが良く容易に計算できる。

$$R_n = n \times E_n \quad \text{式(1)}$$

ここに、 R_n : Energy ratio、 n : 载荷回数、 E_n : 载荷 n 回目の複素弾性率[MPa]

表-8 試験条件

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

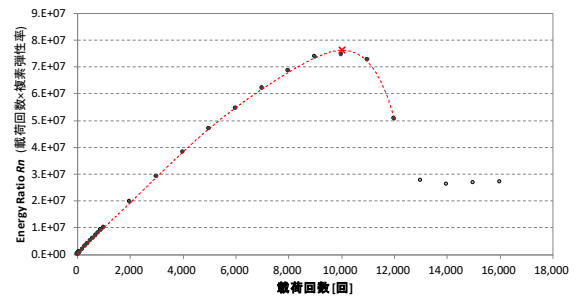


図-4 Energy ratio のデータ例

2.3 試験結果

2.3.1 添加剤の成分差異による影響把握

(1) アスファルト材料性状

1) 再生アスファルト中のアスファルト残存率

アスファルトの劣化・再生を繰り返した際における、再生アスファルト中のアスファルト残存率を図-5 に示す。

本実験では、劣化したアスファルトは添加剤のみを用いて再生した。したがって、再生回数が進むほど、元々のアスファルトが占める割合が減っていく。芳香族分の多い添加剤 A、B は、初期に添加量が多くアスファルト残存率が他のものより小さいものの、繰り返し再生回数が増えいくと、他と同程度の残存率となった。飽和分の多い添加剤 C、D、E は初期に添加量が少なくアスファルト残存率が大きいものの、繰り返し再生が進むと次第に添加量が多く

なっていく、添加剤 A、B と残存率が同程度になった。特に添加剤 D では、添加量の増大が顕著で、再生 5 ではアスファルト残存率が 40% 程度になった。

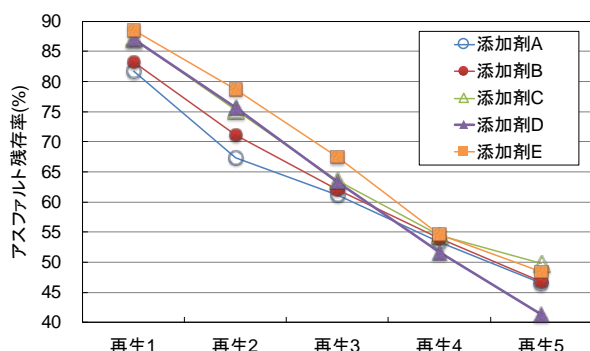


図-5 再生アスファルトのアスファルト残存率

2) 基本物理性状

(a) 劣化・再生アスファルトの針入度

針入度の推移を図-6 に示す。再生アスファルトの目標針入度は 70 としているので、再生後の針入度は添加剤 E の再生 5 を除き 70 となった。添加剤 E に関しては、劣化 5 の時点で針入度が 50 程度となり、促進劣化させても針入度が下がらなくなった。また、添加剤 C の再生 5 では、加熱しても流動性が得にくく、添加剤を加えても均一に混ぜることが困難であったため、針入度調整を正確に実施することができなかった。

(b) 劣化・再生アスファルトの軟化点

軟化点の推移を図-7 に示す。繰り返し再生試験においては、再生回数が増えると軟化点が増加する傾向が見られた。特に、飽和分が多い添加剤 C、D、E の軟化点は、芳香族分が多い添加剤 A、B と比較して、再生 3 以降に顕著に軟化点が増大した。一方で、芳香族分が多い添加剤 A、B の軟化点は、再生 3 までは規格値上限である 52°C 程度で推移しており、再生 5 の時点でも軟化点が 55~65°C 程度と緩やかな上昇となった。これより、芳香族分が多い添加剤 A、B では、飽和分が多く含まれる添加剤 C、D、E と比較して軟化点が ORG に近い性状まで回復するが、飽和分が多く含まれる添加剤 C、D、E では、軟化点の回復効果が小さいため数値が増大したものと考えられた。低針入度再生試験により作製した再生アスファルトにおいても軟化点の回復傾向は、繰り返し再生試験のものと同様であった。

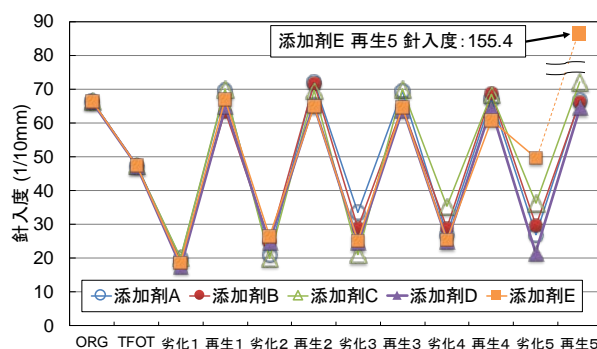


図-6 劣化・再生アスファルトの針入度

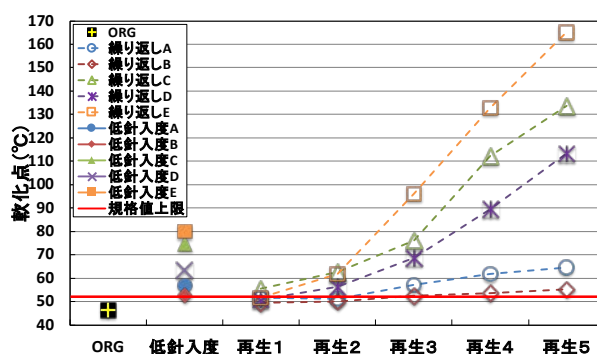


図-7 劣化・再生アスファルトの軟化点

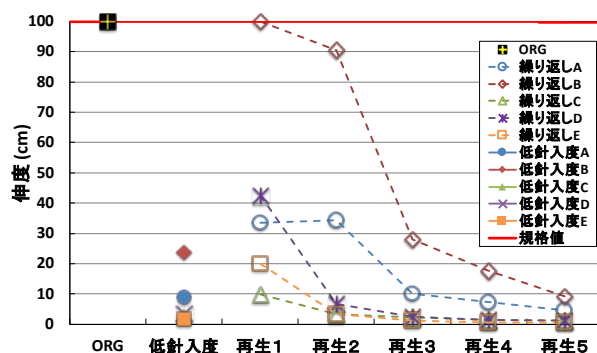


図-8 劣化・再生アスファルトの伸度

(c) 劣化・再生アスファルトの伸度

伸度の推移を図-8 に示す。繰り返し再生試験においては、アスファルトの再生回数が増えるとアスファルトの延性が減少する傾向が見られた。特に、飽和分が多い添加剤 C、D、E の伸度は、再生 2 以降にほとんど延性の回復が見られなかった。しかし、再生 3 回以降いづれも伸度が規格値である 100 まで回復しなかったのは、本試験が新規アスファルトを添加しない非常に厳しい条件であるためと考えた。また、再生回数毎における伸度は、軟化点と同様に添加剤 C、D、E では再生 3 以降ほとんど回復しない傾向となった。これにより、芳香族分が多い添加剤 A、B は、飽和分が多い添加剤 C、D、E と比較して伸度の回復効果が高いことが分かった。伸度の回復においても、低針入

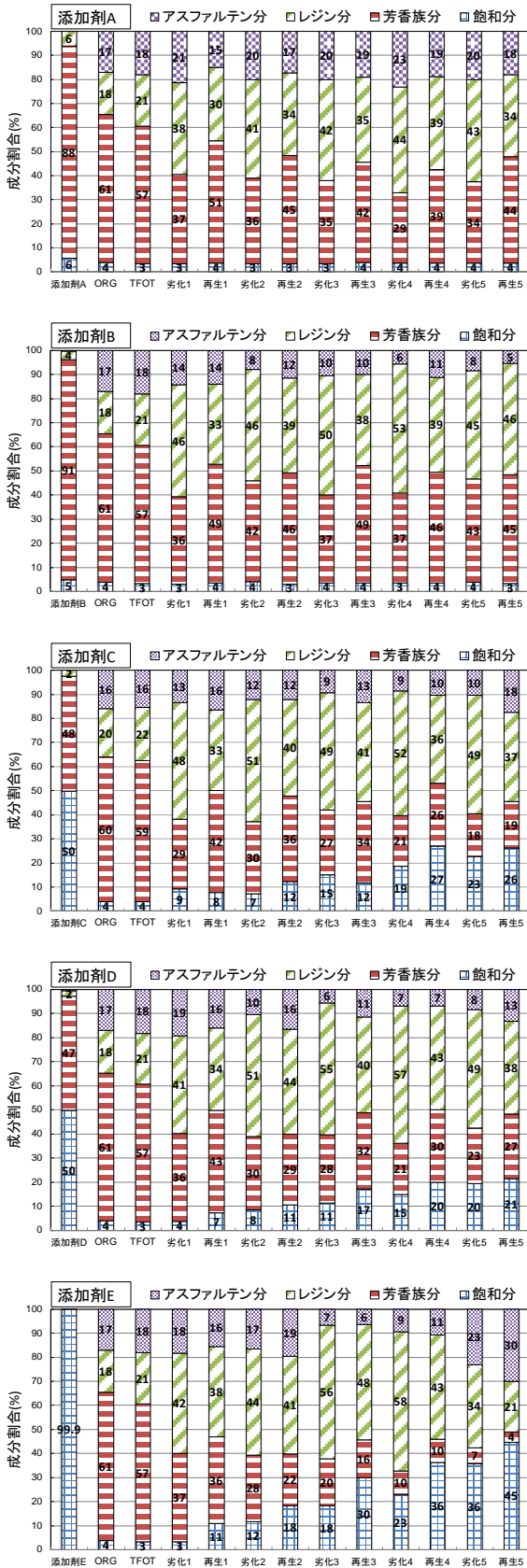


図-9 劣化・再生アスファルトの4成分組成

度再生試験により作製した再生アスファルトは、繰り返し再生試験のものと同様の傾向であった。

(d) 再生アスファルトの4成分組成

4成分組成の推移を図-9に示す。どの添加剤においても劣化時には芳香族分が減少し、レジン分が増加する傾向が見られた。添加剤A、Bでは、再生回数が進んでも再生後の組成比の変化が小さく、再生5でも芳香族分が40%以上となった。これは、芳香族分が多い添加剤による再生では、劣化により減少した芳香族分が添加剤により補われることによるものと考えられた。また、飽和分の多い添加剤C、D、Eでは、再生時に足される芳香族分の量が少ないため、劣化・再生が繰り返されるうちに芳香族分が減少し、飽和分が増加した。特に添加剤Eは、再生時に飽和分しか足されることがないため、繰り返し劣化・再生に伴う芳香族分の減少と飽和分の増加が著しく、再生5では、芳香族分がほとんどない状態となっており、飽和分が45%を占める組成となった。

4成分組成の測定結果より添加剤A、C、Eについてコロイダル指数を求めた結果を図-10に示す。コロイダル指数とは、アスファルテン分と飽和分の和を芳香族分とレジン分の和で除した値を指す。芳香族分が多い添加剤Aではコロイダル指数の変化が小さいのに対し、飽和分の多い添加剤C、Eでは増大する傾向にあり、特に添加剤Eは再生2回目以降の急激に増大した。

以上より、アスファルトの4成分組成分析において飽和分の多い添加剤は、芳香族分が多い添加剤と比較して、再生時に芳香族分の供給が少ないので、再生アスファルトの芳香族分が減少しやすい傾向を示した。特に再生回数が進むと新規アスファルトの性状と大きく異なる組成になることが明らかになった。

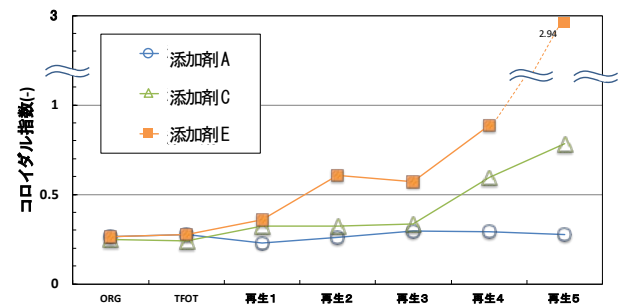


図-10 再生アスファルトのコロイダル指数

(e) ドライスラッジ量試験

各再生アスファルトにおけるスラッジ量を図-11に示す。添加剤C、Eでは繰り返し再生により単調に増加して

いき、再生5ではスラッジ量は25%程度にまでなった。これに対し添加剤Aは再生4と再生5であまり変わらず17%付近で止まるような挙動を示した。芳香族分は、凝集して大きくなったアスファルテンを解膠させる性能を有していると考えられ、その含有率が高い添加剤Aは劣化時に発生したスラッジを多少解膠させたためではないかと考えられた。

これより、芳香族系は、再生回数が進んでもスラッジ量の増加を抑える効果がある可能性が示唆された。

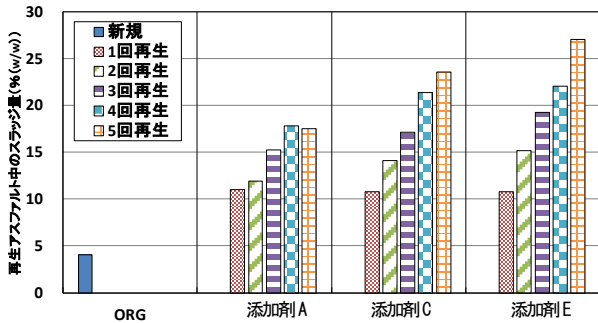


図-11 再生アスファルトのスラッジ量

(2) 混合物試験結果

1) 圧裂試験

新規混合物および添加剤A、C、Eを用いた再生混合物における圧裂試験の結果を図-12~14に示す。試験は、再生3、5について行うことを基本とし、再生5の混合物作製ができなかった添加剤Eでは再生5を再生4に代えて行った。図-12より圧裂強度は、新規混合物では比較的高い強度であるのに対し、再生混合物の強度はほとんどの場合で小さくなった。添加剤C、Eでは再生回数が進むほど強度が小さくなる傾向を示した。これに対し、添加剤Aは、新規混合物に近い値を示し、再生が進んでも強度は小さくならなかった。

図-13より圧裂変位は、新規混合物が0°Cで小さい値、20、60°Cで大きな値を示し、温度に対する変化が大きいものに対し、再生混合物は温度に対する変化が小さかった。添加剤C、Eでは特に小さな値を示し、再生が進むとさらに小さな値になった。添加剤Aは、再生が進んでも変化はあまりなく、全体的に大きな値を示した。

図-14より圧裂係数は、新規混合物は低温で大きく高温で小さくなるのに対し、再生混合物は0°Cで新規混合物より小さく、20°Cで新規混合物と近い性状を示し、60°Cで新規混合物より同等かそれより大きな値を示した。特に添加剤C、Eは60°Cで新規混合物より大きな値を示したのに対し、添加剤Aは新規混合物と同程度となった。

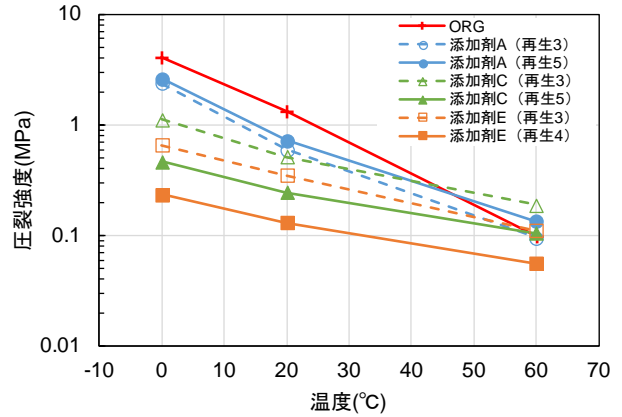


図-12 再生混合物A、C、Eにおける圧裂強度

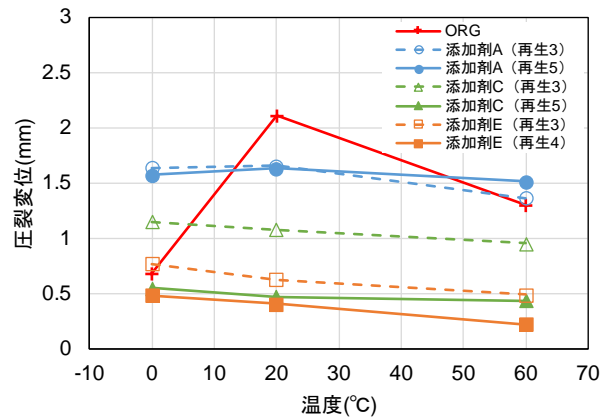


図-13 再生混合物A、C、Eにおける圧裂変位

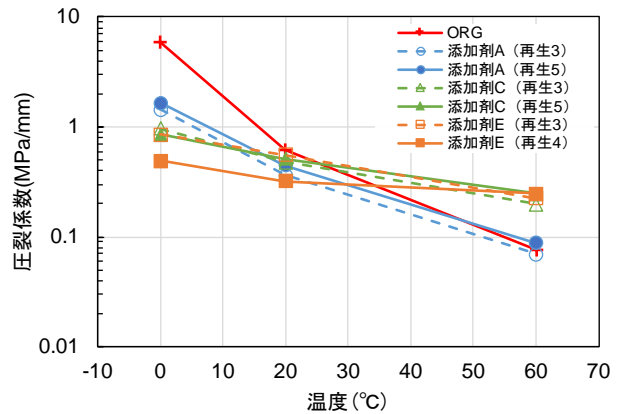


図-14 再生混合物A、C、Eにおける圧裂係数

以上より、圧裂試験の結果、新規混合物と比べ再生混合物は感温性が鈍くなる傾向が見られ、特に飽和分が多い添加剤C、Eでその傾向が強かった。また、添加剤C、Eで再生した場合、圧裂強度、圧裂変位ともに小さくなる傾向を示し、繰り返し再生が進むほど小さくなっていく傾向

を示した。圧裂係数で見ると、20°Cの圧裂係数は新規混合物と再生混合物で同程度になった。これは、過去の研究^例えば¹²⁾により圧裂係数は針入度との相関性が指摘されており、今回どの混合物も25°Cで針入度を70に調整したものをを用いていることから、20°Cの圧裂係数も同程度となったものと考えられる。また、60°Cにおいては新規混合物と添加剤Aを用いた再生混合物と、添加剤C、Eを用いた再生混合物の2つのグループに分かれた。つまり、芳香族分の多い添加剤Aは、20~60°C付近の性状を新規混合物に近い性状まで回復させているのに対し、添加剤C、Eは60°C付近では新規混合物と異なる性状を示した。高温で圧裂係数が大きいことが供用性状においてどのような影響があるかは現時点では明らかではないが、再生混合物が新規混合物より強度が大きく変位が小さい性状を示すことが明らかになった。

次に、図-15に圧裂強度比を示す。圧裂強度比は、0°Cにおける圧裂強度を60°Cにおける圧裂強度で割った値で、圧裂強度比が小さい、つまり感温性が小さくなると、ひび割れが発生しやすいとされている²⁾。その結果、いずれの混合物も繰り返し再生回数が進むにつれて圧裂強度比が低くなっているのがわかる。特に添加剤CとEはORGに比べて傾向が顕著となったことから、ひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

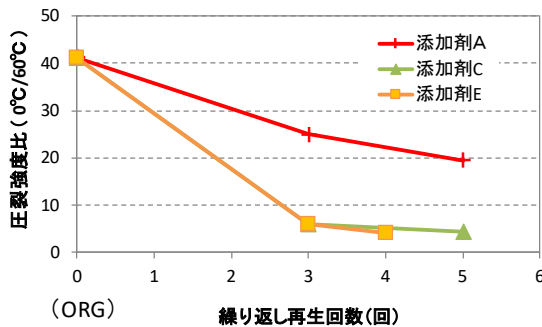


図-15 再生混合物 A, C, E における圧裂強度

2) ホイールトラッキング試験 (動的安定度)

新規混合物および添加剤AおよびCを用いた再生混合物における動的安定度を表-9に示す。動的安定度は、ORG、再生3、再生5になるにしたがって高くなった。これは、圧裂試験において高温域(60°C)で再生混合物の圧裂強度が新規混合物より高くなったこと、軟化点が高くなった結果を反映しているものと考えられる。

表-9 動的安定度

動的安定度(回/mm)	ORG	再生3	再生5
添加剤A	720	3,000	7,880
添加剤C		3,818	6,632

3) 高温カンタプロ試験

図-16に各再生混合物における高温カンタプロ試験で得られたカンタプロ損失率(以下、損失率)を示す。試験は、再生3、5について行うことを基本とし、再生5の混合物作製ができなかった添加剤Eでは再生4を再生5とみなし評価を行った。また、添加剤C、Eは再生3の損失率が高かったため、再生1、2を追加した。ORGの損失率は、ほぼ0%であった。添加剤A、Bの損失率は、再生とともに増加したものの、再生5でも損失率は6%未満であった。一方、添加剤C、D、Eでは、再生が進むにつれ損失率が増大し、再生5では約99%となった。これらは、再生3と早期の段階でも損失率が10%~70%程度となっており、損失率は、添加剤E>添加剤C>添加剤Dの順となった。なお、低針入度再生試験においても、損失率は同様の傾向を示した。

高温カンタプロ試験の結果より、破壊しにくいグループである新規混合物および芳香族分が多い添加剤A、Bを用いた再生混合物と、破壊しやすいグループである飽和分が多い添加剤C、D、Eを用いた再生混合物に分かれた。この結果は、60°Cの圧裂係数で見られた傾向と同様であった。高温カンタプロ試験の試験温度である60°Cは、日本における夏季の路面温度に相当するものである。この温度域では、通常流動わだちを考慮することが多いが、縦表面ひび割れもこの温度域で発生する可能性が指摘されている¹³⁾。この結果より、添加剤の組成や繰り返し再生の進行度合いによっては、縦表面ひび割れあるいは骨材の飛散といった損傷の発生度合いが異なる可能性があると考えられた。

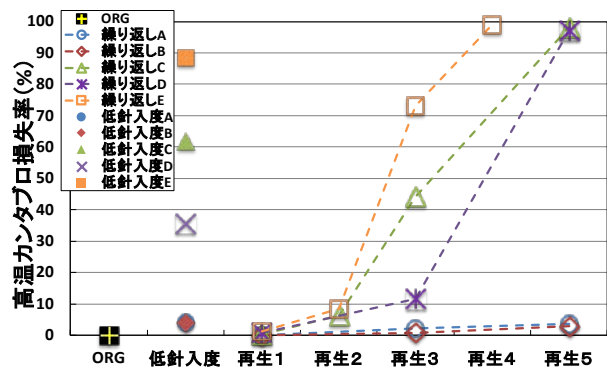


図-16 各再生混合物における高温カンタプロ試験結果

4) WT 疲労試験

図-17 に WT 疲労試験結果を示す。また、写真-1 にひび割れ率 20% 時における混合物の表面状態を示す。写真のように本試験では、表面から走行方向にクラックが発生する。ORG および芳香族分が多い添加剤 A、B で再生した混合物は、走行回数の増加で緩やかにひび割れ率が増加した。これに対して飽和分が多い添加剤 C、D、E で再生したものは早期にひび割れ率が増加した。特に添加剤 E では、ひび割れの進行が早くなった。ひび割れの入りやすさは添加剤 E>C>D>A>B>ORG となり、この傾向は高温カンタブロ試験結果と同様であった。これにより、添加剤の組成によって高温域におけるひび割れの進行度合いに差が出るのがあらためて確認できた。

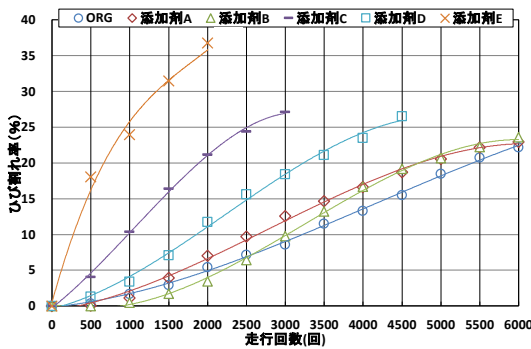


図-17 WT 疲労試験結果



写真-1 ひび割れ率 20% 時の混合物の表面状態

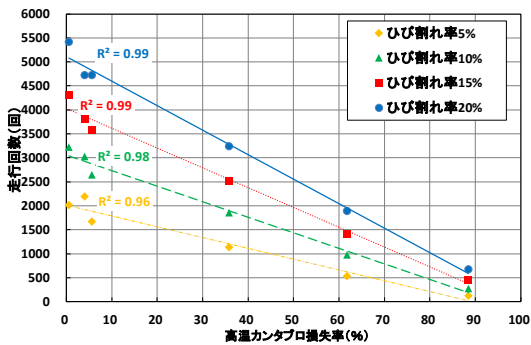


図-18 損失率と WT 疲労試験結果の相関関係

図-18 に高温カンタブロ試験結果と WT 疲労試験結果の相関関係を示す。ここでは、損失率と各混合物のひび割れ率が 5、10、15、20% に達するまでの走行回数との関係を検証した。いずれのひび割れ率においても、走行回数と損

失率との間の決定係数は 0.9 を超えており、高い相関性が認められた。以上より、高温カンタブロ試験は WT 疲労試験と相関があり、簡易にひび割れ抵抗性を評価できる可能性があることが分かった。

2.3.2 配合率の差異による影響把握

配合率の差異による影響把握では、R 率 100% に加えて 80% および 60% において、添加剤 A および C により混合物の繰り返し再生を行い、圧裂試験および小型曲げ試験、高温カンタブロ試験により混合物性状の変化を把握した。

(1) 圧裂試験

1) 圧裂強度

圧裂強度を図-19 に示す。低温条件下 (0°C) の圧裂強度はいずれも繰り返し再生が進むにつれて減少傾向となった。その傾向は、R 率が 100% より 80%、添加剤が C より A のほうが緩やかになった。一方、高温条件下 (60°C) では、圧裂強度は全体的に絶対値が小さく、差は僅かであるが添加剤 C の 100% 再生以外は増加傾向となった。低温条件と同様に、添加剤 A による 80% 再生の性状変化は緩やかとなった。

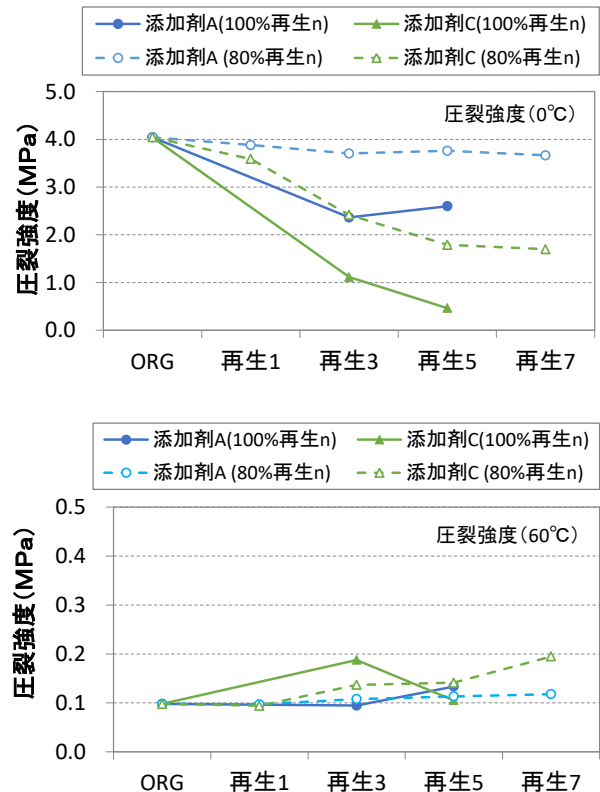


図-19 圧裂強度 (上: 0°C、下: 60°C)

次に、圧裂強度比 (0°C/60°C) を図-20 に示す。圧裂強度比は値が大きいとわだち掘れが大きく、小さいとひび割

れが発生しやすいとされている²⁾。図より、圧裂強度比はいずれも繰り返し再生が進むにつれ減少した。特に、80%再生より100%再生、添加剤AよりCのほうが傾向が顕著となったことから、ひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

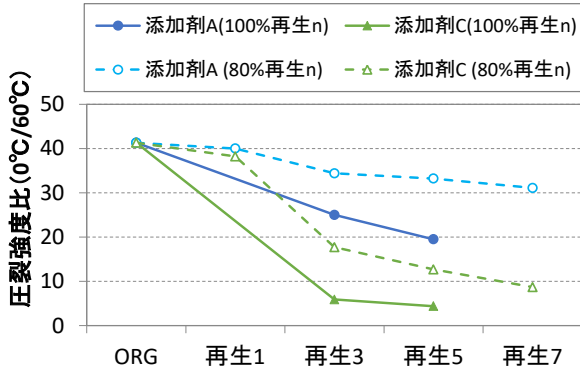


図-20 圧裂強度比

2) 圧裂変位および圧裂係数

圧裂変位および圧裂係数を図-21、22に示す。低温条件下では、圧裂変位が再生3回まで上昇しそれ以降はやや減少傾向または横ばいとなったため、圧裂係数はそれに応じて再生3回まで減少傾向、その後横ばいとなった。また、高温条件では、添加剤Aの圧裂変位は横ばい、添加剤C(特に100%再生)は減少したため、圧裂係数は添加剤Cの100%再生が他に比べ上昇した。これら0°Cおよび60°Cの圧裂係数と舗装の供用性についてはまだ明らかになっていないが、ORGと明らかに差が生じたことから、今後も各種試験結果との関連性を検討していきたい。

(2) 小型曲げ試験

低温時の脆性を把握するための小型曲げ試験結果を図-23に示す。繰り返し再生が進むにつれ、脆化点(強度のピーク、ひずみの変曲点)が低温側にシフトしていくのがわかる。これは、再生混合物は新規混合物より、低温時のたわみ追従性を有するとも言える。ただし、0°C以上の曲げ強度に着目すると、ORGより大きく低下していることから高温でのひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

(3) 曲げ疲労試験

(a) 繰り返し劣化・再生されたアスファルト混合物の破壊回数 (N_E)

N_E の推移を図-24に示す。縦軸の破壊回数は対数表示であるが、芳香族分の多い添加剤Aで再生された混合物は、再生回数が進んでも新規混合物(ORG)と同等であったのに対し、飽和分が多い添加剤Cを用いた場合は、再生回

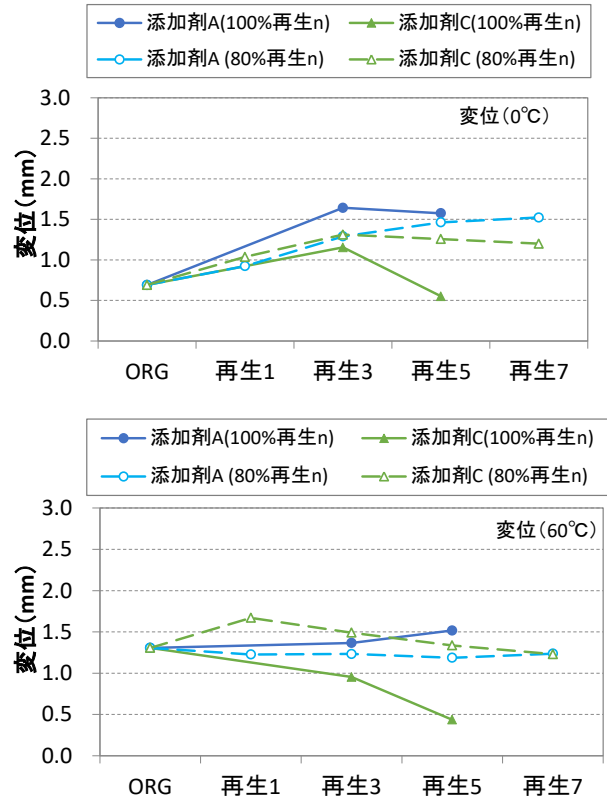


図-21 圧裂変位 (上: 0°C、下: 60°C)

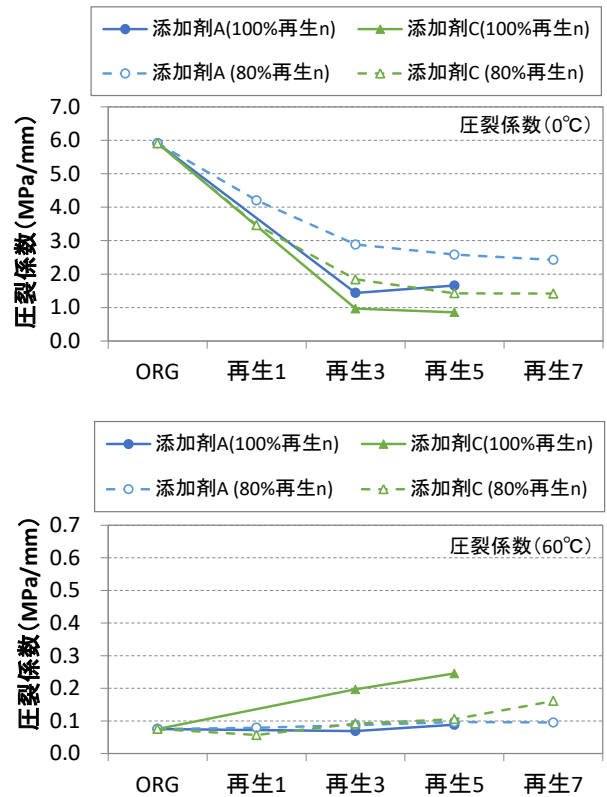


図-22 圧裂係数 (上: 0°C、下: 60°C)

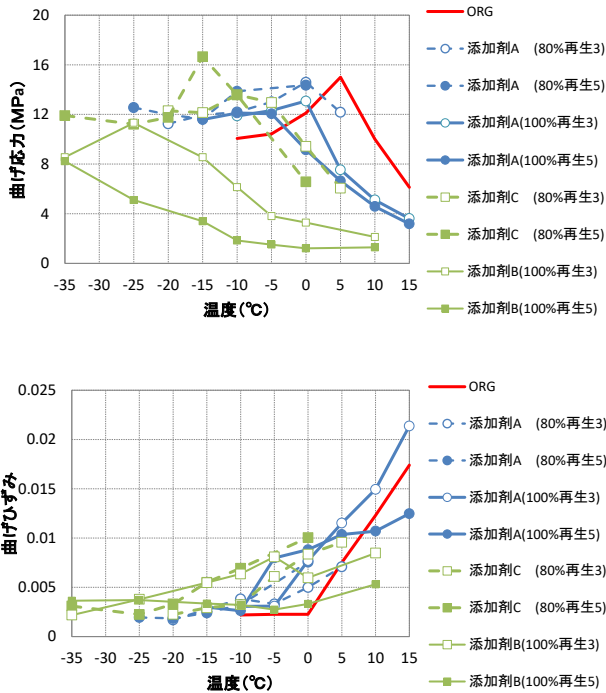


図-23 小型曲げ試験結果（上：曲げ強度、下：曲げひずみ）

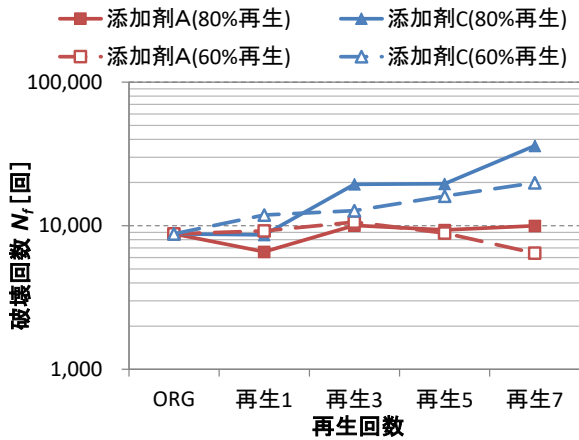


図-24 破壊回数 N_r の推移

数が進むほど、再生骨材配合率が高くなるほど増加した。既往研究では試験温度 20°C で再生骨材配合率を変化させて曲げ疲労試験を行っているが、これと同じ傾向となった。

次に、初期複素弾性率 E_{ini} （载荷 1000 回）の推移を図-25 に示す。図より、いずれの再生混合物も再生回数が進むにつれて低下した。この傾向は再生骨材配合率が高いほど、添加剤 A より C のほうが顕著になり、特に添加剤 C により 7 回繰り返し再生された混合物は ORG に比べ 40% 以下となった。この低い複素弾性率の混合物については、基層に比べて表層の複素弾性率が相対的に小さい場合に

は表層表面近くに最大ひずみが発生し、舗装表面から入るひび割れの発生要因になることが指摘されていることから、複素弾性率の急激な低下や高温時（低い複素弾性率）におけるひび割れ抵抗性への影響が懸念される。なお、曲げ疲労試験には応力制御とひずみ制御があり、前者は複素弾性率が高いものほど発生するひずみが小さく疲労寿命は長くなり、後者は複素弾性率が高いものほど発生する応力が大きく寿命は小さくなる。本試験はひずみ制御で行っていることから E_{ini} と N_{FE} の関係（図-26）は前述のとおり負の相関関係となった。

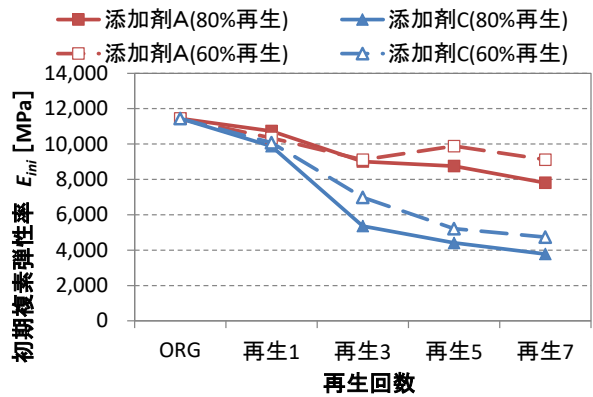


図-25 初期複素弾性率 E_{ini} の推移

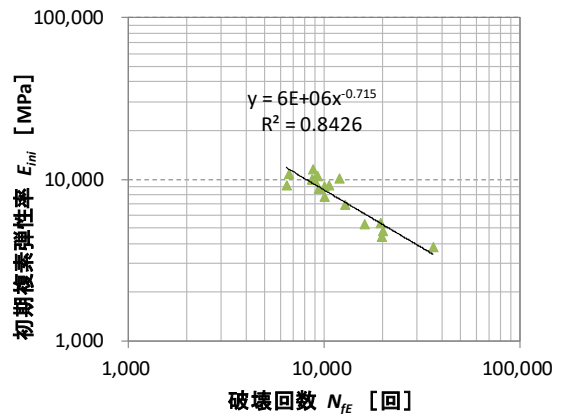


図-26 N_{FE} と E_{ini} の関係

(b) Energy ratio による破壊回数 (N_{FR})

N_{FR} と N_{FE} の関係を図-27 に示す。両指標とも両対数表示上で直線となる関係にあることがわかる。 N_{FR} の算出には、複素弾性率の急激な低下前後で接線を設定して交点を計算する必要があるのに対して、 N_{FR} は前述のとおり計算が容易なことから、今後は N_{FE} の代わりに N_{FR} も活用可能と考えられる。

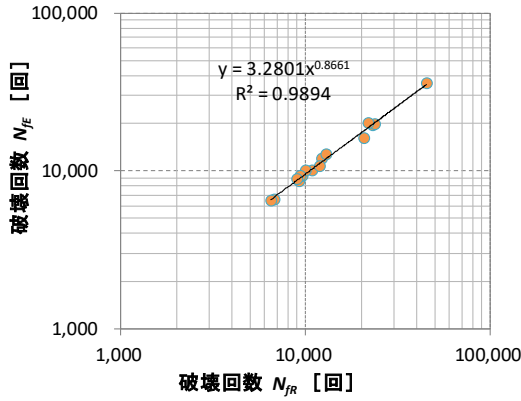


図-27 N_{FE} と N_{FR} の関係

2.4 まとめ

本研究では、アスファルト混合物の繰り返し再生に関して、再生用添加剤の成分や再生骨材配合率の差異による影響の把握・検討を行った。その結果、アスファルトを繰り返し再生することによって、再生用添加剤の成分により再生アスファルトの軟化点の上昇傾向や飽和分・芳香族分の成分組成に顕著な差が現れることがわかった。また、混合物試験においても再生用添加剤の組成や再生骨材配合率の違いの影響は、高温性状に表れやすい可能性が示唆された。

今後も引き続き、再生用添加剤の成分や再生骨材配合率の差異による繰り返し再生に与える影響に関する試験データを充実していくとともに、本実験で得られた結果と実際の舗装の破損形態との関連性について検討を進めていく予定である。

3. 積雪寒冷地の再生骨材の品質規格・品質管理方法及び有効利用法の開発

アスファルトの繰り返し再生利用により、今後、寒冷地では舗装寿命への影響が強く現れることが懸念されている。また、積雪寒冷地の地方部においては、舗装工事減少に伴いアスファルト塊の再生混合物への利用量が減少しており、用途拡大が求められている。ここでは、積雪寒冷地における再生骨材および再生混合物の性状について、舗装工事箇所より採取した試料を用いた検討を実施した結果と、アスファルト再生骨材の積雪寒冷地における凍上抑制層材料および歩道用路盤材料としての適用性を検証するため、試験施工を実施し施工性・支持力、供用性状について評価した結果について述べる。

3.1 積雪寒冷地の A_s 再生骨材に対する品質規格値、品質管理手法の検討

積雪寒冷地である北海道では、1998 年度から表層混合

物にアスファルト再生骨材(以下、再生骨材)が利用され、現在、舗装発生材の再利用を始めてから約 20 年が経過している。このため、舗装発生材は何度も繰り返し利用されており、再生骨材に付着しているアスファルト(以下、旧アスファルト)の品質が変状し、舗装寿命に影響することが懸念されている。本年度は、設計圧裂係数を用いた再生混合物の配合設計法の積雪寒冷地材料への適用性の検証と、繰り返しリサイクルを行うことにより劣化の進んだ再生骨材が再生混合物の性状に及ぼす影響を室内試験により評価した結果について報告する。

3.1.1 評価方法

再生混合物の配合設計においては地域によって異なる使用材料ごとに設計圧裂係数が示されている(図-28)。

しかし、北海道で用いられているストレートアスファルト 80-100 に対する設計圧裂係数については検討されておらず、北海道内において設計圧裂係数による配合設計並びに圧裂係数による品質管理は進んでいないのが現状である。

そこで、既存の針入度による配合設計法で室内において作製した再生混合物、および北海道内の再生アスファルトプラントより収集した再生混合物を用いて、再生アスファルト 80-100 における設計圧裂係数の検討を行った。

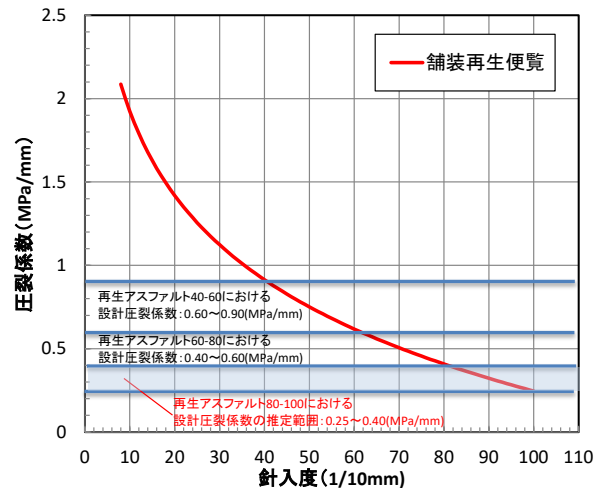


図-28 再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係

(1) 評価対象

北海道内のプラントより、再生混合物および再生骨材を収集し、評価に用いた。詳細は以下の通りである。

- ①室内作製混合物：旧アスファルトの針入度が 20 の試料をプラントより収集し、寒地土木研究所にて配合設計を実施した再生混合物
- ②現場混合物：4 箇所の舗装現場でアスファルトフィニッ

シヤのホッパより採取した再生混合物

③再検討混合物:②に示した舗装現場の再生混合物出荷当日にアスファルトプラントの骨材ストックヤードより採取した骨材を持ち帰り、再生骨材の旧アス針入度を評価し、当研究所で改めて再生添加剤の添加率を決定し、配合設計を行った再生混合物

(2) 配合条件

評価に用いる再生混合物の配合は、北海道の国道で一般的に使用されている再生密粒度アスコン 13F とし、アスファルトバインダは北海道で主として用いられているストレートアスファルト 80-100 である。

また、再生にあたっては、舗装再生便覧に示されている設計針入度への調整を行う方法を用い、設計針入度はストレートアスファルト 80-100 の中央値である 90 で統一している。

3.1.2 試験結果

(1) 室内作製混合物

再生混合率の異なる 3 条件の再生混合物を作製し圧裂係数を計測した。結果を図-29 に示す。圧裂係数は 0.29~0.35 MPa/mm の範囲であり、図-28 に示される圧裂係数と針入度の関係より推定される再生アスファルト 80-100 の設計圧裂係数の範囲は 0.25~0.40 MPa/mm となるが、圧裂係数はいずれもこの範囲に入る結果となった。

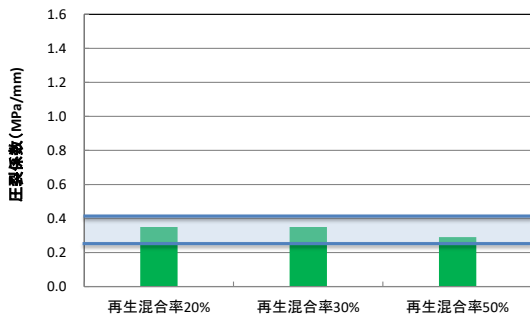


図-29 室内作製再生混合物の圧裂係数

(2) 現場混合物

圧裂試験の結果を図-30 に示す。圧裂係数は 0.86~1.27 MPa/mm であり、①室内作製混合物と異なり 0.25~0.40 MPa/mm の範囲内に収まらない結果となった。

(3) 再検討混合物

②現場混合物の配合設計に用いられた旧 As の針入度と再生添加剤添加量、および③再検討混合物の配合設計に用いられた旧 As の針入度と再生添加剤添加量を表-10 に示す。両者の旧 As 針入度の値に大きな開きが見られ、これ

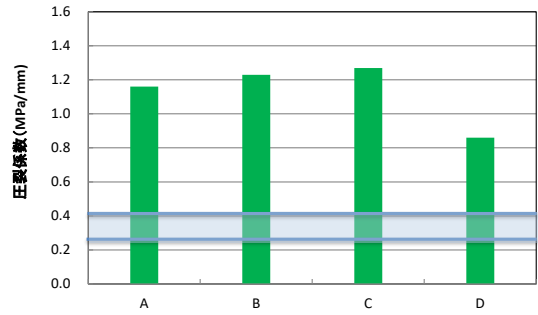


図-30 現場混合物の圧裂係数

に起因して再生添加剤の添加量も大きく異なる結果となった。この要因として、現場配合は年度当初に行われているが、再生骨材の性状は出荷時期によって変動するためであると考えられる。

圧裂試験の結果を図-31 に示す。圧裂係数は 0.59~0.77 MPa/mm となり、②現場混合物と比較して小さな値となった。ただし、再生アスファルト 80-100 の設計圧裂係数の推定範囲である 0.25~0.40 MPa/mm には収まらない結果となった。

表-10 旧 As 針入度と再生添加剤添加量

箇所名	A	B	C	D
針入度 (1/10mm)【現場配合設計】	34	29	30	30
再生添加剤添加率 (%)【現場配合設計】	10.9	14.2	12.0	8.0
針入度 (1/10mm)【再検討】	20	18	19	21
再生添加剤添加率 (%)【再検討】	18.6	20.4	23.5	20.0

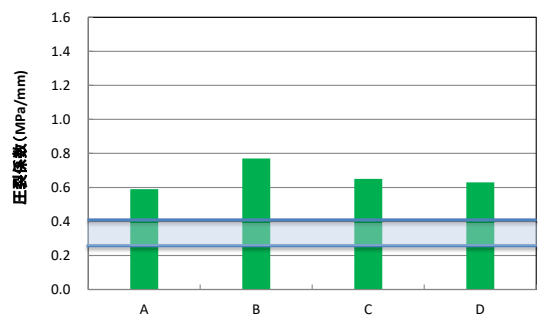


図-31 再検討混合物の圧裂係数

(4) 再生骨材と再生混合物の圧裂係数の関係

③再検討混合物においても再生アスファルト 80-100 の設計圧裂係数の推定範囲である 0.25~0.40 MPa/mm よりも高い値となっている。この要因として、再生骨材の性状の影響が考えられことから、再生骨材の性状を適切に評価して再生添加剤を決定した①室内作製混合物と③再検討混合物の試験結果を用いて、図-32 に示すように再生骨材と再生混合物の圧裂係数の関係を整理した。

この結果、再生骨材の圧裂係数が高いと再生混合物の圧裂係数も高くなる傾向が確認された。また、再生骨材の圧裂係数が規格値の1.7MPa/mmを超えると、針入度90を目標に再生添加剤を添加しても再生混合物の圧裂係数は0.25~0.40 MPa/mmの範囲を外れることが確認された。

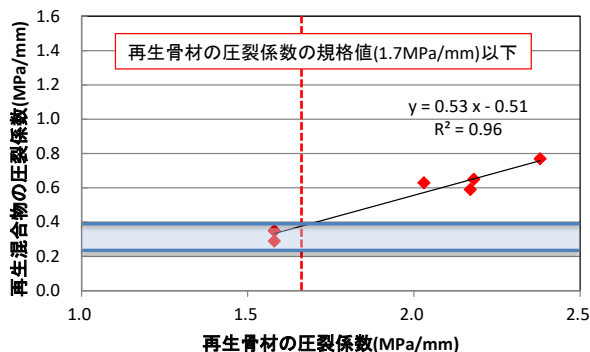


図-32 再生骨材と再生混合物の圧裂係数の関係

3.1.3 考察

図-28 に示した舗装再生便覧に記載のある再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係から推測すると再生アスファルト 80-100 に対応する設計圧裂係数は0.25~0.40 MPa/mm 程度と想定される。しかし、現場混合物の範囲は0.86~1.27 MPa/mm であり、再検討混合物でも0.59~0.77 MPa/mm と、推定範囲より大きな値となった。この要因として、再生骨材の圧裂係数が再生混合物の圧裂係数に影響したことが明らかになった。

一方、再生混合物に使用する再生骨材の圧裂係数が1.7 MPa/mm 以下の場合、再生混合物の圧裂係数が0.25~0.40 MPa/mm の範囲に入ることが確認された。これらのことから、圧裂係数の品質規格を満たす再生骨材を使用すれば、舗装設計便覧に示される再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係より設計圧裂係数を0.25~0.40 MPa/mm と設定し、設計圧裂係数による配合設計が可能となると考える。

なお、試料採取を行った4箇所すべてにおいて再生骨材の旧Asの針入度は規格下限である20程度であり、圧裂係数は規格値を外れ2.0MPa/mmを超える劣化の進んだ材料であった。今後、As舗装材料の繰り返し利用が進んでいくと、このような材料が増加してくることが予想されるため、低品質再生骨材の再生利用方法についての検討が急務であると考えられる。

また、本年度に行った北海道地区における再生添加剤に関する調査により、当該地区で用いられている再生添加剤はすべて飽和分主体の製品であることが確認されており、2章において飽和分を主成分とする再生添加剤よりも芳

香族分を主成分とするもののほうが、性状回復に適しているとの結果が得られていることから、今後、芳香族分を主成分とした再生添加剤を用いた評価を行っていく予定である。

3.2 再生骨材の凍上抑制層等への利用方法の検討

現在、アスファルト舗装発生材(以下、舗装発生材)は、主に再生加熱アスファルト混合物用骨材として有効利用されている。しかし、再生アスファルトプラントの型式が、新規材料のみを加熱し、常温の再生骨材と混合する間接加熱混合式プラントの場合、再生骨材の混合率を低く抑えなければならず、使用量が限られてくる。間接加熱混合式のプラントの多い地域では、舗装発生材の発生量と使用量のバランスがとれず、中間処理施設のストック量が著しく増大し、新たな舗装発生材の受入ができない状況にある。

そこで、舗装発生材のアスファルト混合物以外への有効利用方法の検討が求められている。これまでに、凍上抑制層材料および歩道用路盤材料としての利用方法について、検討を行った結果を報告する。

3.2.1 凍上抑制層材料の検討に用いた再生骨材の性状

凍上抑制層材料の検討に用いた再生骨材の性状を表-11に示す。採取した再生骨材は、凍上抑制層材料としての洗い試験の規格値を満足し、凍上試験においても合格となる材料であることが確認された。

表-11 再生骨材の性状

試験項目	単位	As再生骨材	規格値
洗い試験	全量に対する0.075mm通過量	%	2.57
	4.75mm以下に対する0.075mm通過量	%	7.13
密度・吸水率試験	表乾密度	g/cm ³	2.369
	絶乾密度	g/cm ³	2.303
	吸水率	%	2.88
修正CBR試験	最適含水比	%	4.8
	最大乾燥密度	g/cm ³	1.917
	修正CBR(20°C)	%	12.3
土の液性限界・塑性限界試験	塑性指数	-	NP
凍上試験	凍上率(道路土工排水工指針による)	%	7.5
			20以下

3.2.2 凍上抑制層としての支持力評価

再生骨材を凍上抑制層材料として用いる場合、路床材料としての扱いとなり、20cm以上の層厚となる場合、設計CBRの再計算が必要となるため、支持力を確認する必要がある。特に、温度の上昇によって支持力が低下することが知られており、温度と支持力の関係を把握することが重要である。ここでは、修正CBR試験、実施工箇所のCBRを現場にて簡易に推定できるダイナミックコーンペネトrometer試験(以下、DCP試験)、およびFWD試験を用いて評価を行った。各試験結果を以下に示す。

(1) 修正 CBR 試験

表-11 に示した材料を含む北海道内の4箇所のアスファルトプラントより採取した再生骨材に対し試験温度を変化させて修正 CBR 試験を実施した。修正 CBR と温度の関係を図-33 に示す。温度が上昇するに伴い修正 CBR が低下し、概ね 30℃で修正 CBR が 10%以下となる結果となった。

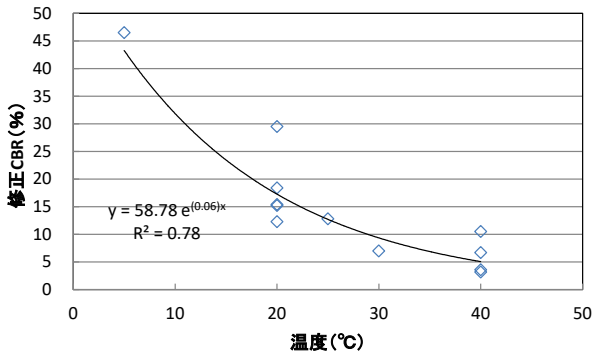


図-33 修正 CBR と温度の関係

(2) DCP 試験

表-11 に示した材料を層厚 30cm で転圧し、測定日を変えて、温度の異なる条件で DCP 試験を実施した。得られた結果より推定した CBR と温度の関係を図-34 に示す。修正 CBR 同様に、温度の上昇に伴い推定 CBR は低下する傾向となった。また、概ね 30℃で推定 CBR が 30%以下となる結果となっている。

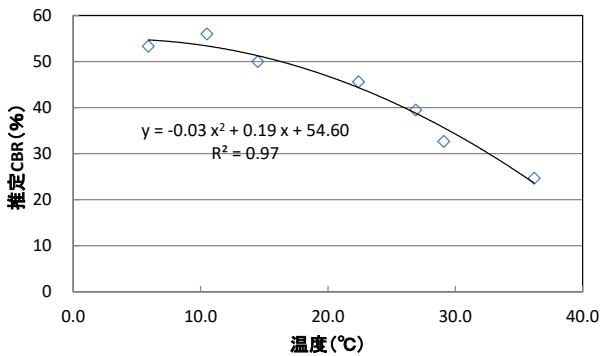


図-34 推定 CBR と温度の関係

3.2.3 路床材料としての CBR の検討

修正 CBR および DCP 試験の結果より、温度が上昇すると支持力が低下する傾向が見られたことから、実道における凍上抑制層温度の把握を行った。北海道北部地域の国道に設置した舗装内温度計の測定結果を図-35、36 に示す。2 路線ともいずれの調査年においても凍上抑制層の

温度は 30℃まで達していない状況であった。

As 再生骨材は図-33 に示したとおり 30℃未満の条件であれば、10%以上の修正 CBR が得られると考えられる。

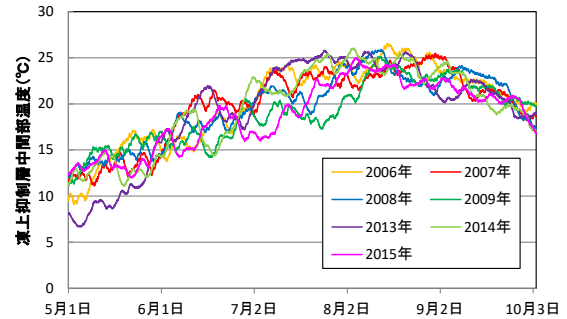


図-35 R238 稚内の凍上抑制層温度

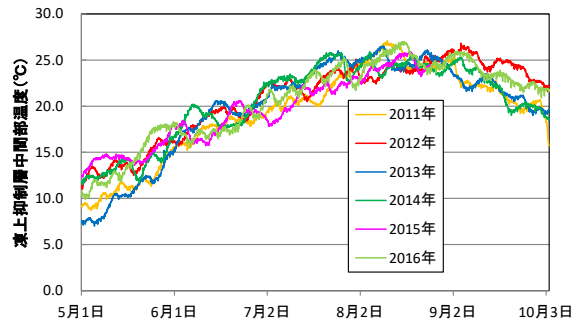


図-36 R231 留萌の凍上抑制層温度

3.2.4 凍上抑制層としての供用性状の評価

(1) FWD 試験

表-9 に示した再生骨材と切込砕石 80mm 級を凍上抑制層材料として用いた試験施工を行い、図-37 のように断面を造成し、FWD 試験で経年調査を実施した。調査時期は、春期、夏期、秋期とした。

荷重補正した D_0 たわみ量の測定結果を図-38 に示す。再生骨材は切込砕石と比較して概ね同等の値で推移している。また、融解期である 5 月の再生骨材と切込砕石の値はほぼ同等であり、融解期の明確な支持力低下は確認されなかった。さらに、温度上昇により支持力低下が懸念される夏期(7、8月)においても、再生骨材と切込砕石の値はほぼ同等であり、明確な支持力低下は確認されなかった。

3.2.5 積雪寒冷地における歩道舗装の損傷事例

積雪寒冷地である北海道における歩道では、表層に歩道用細粒度アスコン ($t=3$ cm)、路盤および凍上抑制層 ($t=27$ cm) に切込砕石等の粒状材を用いる舗装構造となっている。30cm の置換厚を確保しているが車道よりも置換厚が

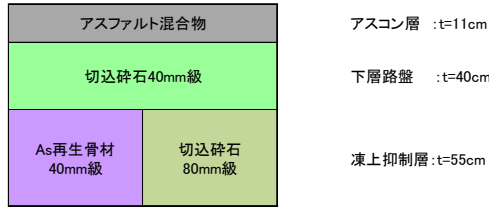


図-37 試験施工箇所の断面

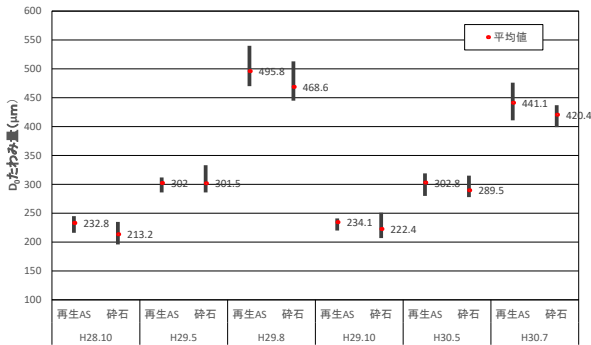


図-38 FWDによるD0たわみ量

小さいため、特に冬期間気温が低く積雪の少ない地域では、凍上により表層にひび割れが生じやすく写真-2に示す縦断方向のひび割れが多数見られる。また、特に冬期間気温が低い地域では写真-1に見られる横断方向のひび割れである低温ひび割れが多数確認されている。これらのひび割れ部に植物の種子や根が入り込み雑草が繁茂し、通行や維持管理に大きな支障をきたす事例が発生している。



写真-2 歩道の凍上ひび割れおよび低温ひび割れ

3.2.6 歩道路盤材料の検討に用いた再生骨材の性状

歩道路盤材料の検討に用いた再生骨材の性状を表-12に示す。検討に用いた再生骨材は、路盤材料としての洗い試験の規格値を満足し、凍上試験においても合格となる材料であることが確認された。なお、再生骨材の修正 CBR は規格値を下回る値であったため、後述する試験施工によ

り支持力評価を行った。

表-12 路盤材料の品質

		再生骨材	切込砕石	規格値
単位容積質量試験	単位容積質量	kg/m ³	1,462	1,826
	絶対密度	g/cm ³	2,376	2,590
密度および吸水率試験	表乾燥密度	g/cm ³	2,447	2,638
	吸水率	%	3.02	1.87
	全量に対する0.075mm通過率	%	2.10	2.72
洗い試験	4.75mm以下に対する0.075mm通過率	%	5.71	10.50
	修正CBR試験	%	8.7	88.7
修正CBR試験	最適含水比	%	5.0	5.9
	最大乾燥密度	g/cm ³	1,954	2,102
	凍上試験	道路土工要領	非凍上性	-

3.2.7 歩道路盤材料としての支持力評価

歩道路盤材料としての支持力評価およびその後の供用性状を確認するため、歩道路盤に再生骨材を用いた試験施工を北海道北部地域で実施した。試験施工では再生骨材を使用した工区と、一般的に歩道路盤材料に用いられている切込砕石 40mm 級（以下、切込砕石）を使用した工区を設けた。

(1) DCP 試験

DCP 試験により支持力評価を行った。DCP 試験より得られた値より CBR を推定した図-39に示す。再生骨材の推定 CBR の平均値は 31.8%を示し、切込砕石の 17.4%よりも高く十分な支持力を有していることを確認した。



図-39 DCP 試験結果

3.2.8 歩道路盤材料としての供用性状の評価

(1) 小型 FWD 試験

小型 FWD 試験により供用後の支持力評価を行った。試験結果を図-40に示す。再生骨材は通年を通して切込砕石と同等程度以上の K₃₀値を示し、十分な支持力を有することを確認した。

(2) 路面の不陸・ひびわれ調査

MRP を用いて不陸の発生状況を確認した。再生骨材を用いた工区の横断プロファイルを図-41に示す。施工後一

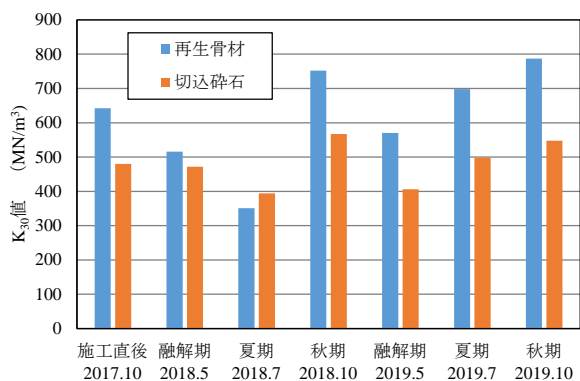


図-40 小型 FWD による支持力の推移

冬経過後の 2018 年 6 月、二冬経過後の 2019 年 5 月および供用 2 年経過後の 2019 年 10 月において計測を行ったが、いずれも大きな不陸は確認されず良好な路面性状を示していることを確認した。

また、舗装体内に埋設した熱電対温度計の計測データより、冬期間に凍結が路床まで到達していること確認したが、再生骨材を用いた工区において凍上に起因するひび割れを含めひび割れは観測されなかった。

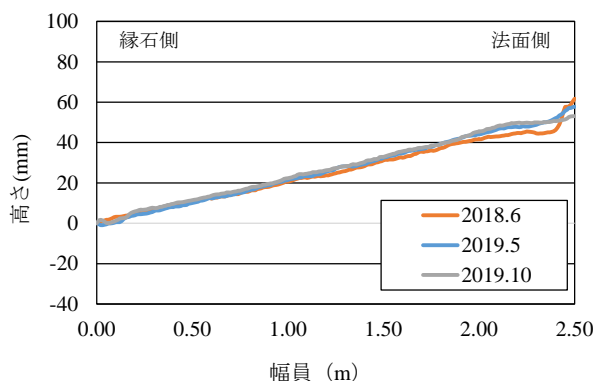


図-41 再生骨材を用いた工区の横断プロファイル

3.2.8 まとめ

舗装発生材の利用方法に課題を抱える北海道北部地域の環境条件下において、再生骨材を凍上抑制層材料として用いた場合、施工性、支持力、供用性状に問題はなく、切込砕石と同等の性能が期待でき利用可能であることを明らかにした。また、歩道用路盤材料としての施工性、支持力、供用初期性状に問題はなく、切込砕石と同等以上の性能が期待できることを明らかにした。今後、引き続きひび割れ抑制効果および雑草繁茂抑制効果について兼用していく。

4. まとめ

令和元年度までに、アスファルト混合物の繰返し再生による影響を把握するため、室内においてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。また、設計圧裂係数を用いた配合設計法の積雪寒冷地における適用性等を室内試験により検討するとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料としての適用性を検証した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 芳香族分の多い再生用添加剤により繰返し再生した場合、初期に添加量が多くなるが、繰返し再生しても添加量はあまり変化しなかった。一方、飽和分の多い再生用添加剤では、初期に添加量が少ないものの、繰返し再生が進むと次第に添加量が増える傾向があった。
- 2) 繰返し再生すると、どの再生用添加剤でも軟化点が上昇する傾向が見られた。特に飽和分の多い再生用添加剤により繰返し再生した場合、軟化点の上昇が顕著であった。
- 3) 伸度においては、再生用添加剤のみで再生した場合、新規アスファルトと同等程度まで回復させることは難しく、特に繰返し再生が進むと、どの再生用添加剤でも十分に回復させることはできなかった。
- 4) アスファルトの 4 成分組成分析において飽和分の多い添加剤は、芳香族分の多い添加剤と比較して、再生時に芳香族分の供給が少ないので、再生アスファルトの芳香族分が減少しやすい傾向を示した。特に再生回数が進むと新規アスファルトと大きく異なる組成になることが明らかになった。
- 5) 圧裂試験の結果、飽和分が多い再生用添加剤の場合、繰返し再生すると次第に圧裂強度、圧裂変位が小さくなっていく傾向が見られた。芳香族分が多い再生用添加剤の場合、新規アスファルトと比べると 0°C の性状が多少異なるものの、20°C、60°C の性状はかなり近いものになった。60°C の圧裂係数を見ると、芳香族分が多い再生用添加剤で再生したものと新規アスファルトのものは小さかったが、飽和分が多い再生用添加剤を用いたものは大きくなった。再生用添加剤の組成の違いの影響は、高温性状に表れやすい可能性が示唆された。
- 6) 高温カンタブロ試験の結果、飽和分の多い再生用添加剤で繰返し再生を行うと、損失率が高くなる傾向が見られた。芳香族分が多い再生用添加剤で繰返し再生した場合は、損失率の増加は顕著ではなかった。
- 7) 繰返し再生が進むにつれて再生骨材配合率および添加剤の成分差異により、新規混合物の性状との差が大き

- くなることがわかった。この繰り返し再生による新規混合物のとの差は、再生骨材配合率 100%と再生骨材配合率 80%とも同様な傾向を示したが、再生骨材配合率では 80%、添加剤は A のほうが性状変化の傾向は緩やかになることがわかった。
- 8) 舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験とされる WT 疲労試験を行った結果、添加剤の組成によって高温域におけるひび割れの進行度合いに差が出ることを確認された。また、高温カンタブロ試験結果と高い相関が得られたことから、高温カンタブロ試験は簡易にひび割れ抵抗性を評価できる可能性があることが分かった。
- 9) 繰り返し劣化・再生された混合物の曲げ疲労試験の結果、再生骨材配合率や再生用添加剤の種類によって、破壊回数や複素弾性率の明確な変化が確認できた。また、疲労破壊を定義する新たな指標として Energy ratio が有効であることを確認した。今後も異なる再生骨材配合率での試験や高温時のひび割れ抵抗性試験により繰り返し再生された混合物の影響について引き続き検討を行う予定である。
- 10) 北海道地域で用いられている針入度規格 80-100 の再生混合物においても、圧裂係数の品質規格を満たす再生骨材を使用した場合においては、舗装設計便覧に示される再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係より設計圧裂係数を 0.25~0.40 MPa/mm と設定し、設計圧裂係数による配合設計が可能となると考える。
- 11) 再生骨材は、北海道北部地域において凍上抑制層に用いた場合、施工性、支持力、供用性状に問題はなく、車道用凍上抑制層材料として利用可能であることを明らかにした。
- 12) 再生骨材は、北海道北部地域において歩道路盤材料に用いた場合、施工性、支持力、供用初期性状に問題はないことが明らかになった。
- 5) 佐野昌洋、瀬尾彰：再生混合物の性能向上に関する一検討、土木学第 72 回年次学術講演会、V-103、2017。
- 6) ISO 10307-1 : Petroleum products -- Total sediment in residual fuel oils -- Part 1: Determination by hot filtration, 2009
- 7) 新田弘之、川上篤史、西崎到：小型供試体による曲げ試験特性と中温化混合物の評価、土木学会第 67 回年次学術講演会、V-362、2012.9
- 8) 平戸利明、姫野賢治、村山雅人、高橋将人、高橋修：応力緩和に着目した縦表面ひび割れの発生メカニズムとその要因土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、舗装工学論文集第 21 巻、I_203-I_210、2016。
- 9) 田湯文将、新田弘之、川上篤史、川島陽子：再生用添加剤の成分差異が再生アスファルトおよびその再生混合物の性状に与える影響、土木学会 第 73 回年次学術講演会講演概要集、V-631、2018。
- 10) M.N. Partl et al.: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials, RILEM State-of-the-Art Reports 9, RILEM, 2013.
- 11) 新田弘之：アスファルト材料について、アスファルト、Vol.53、No.226、pp.23-30、2010。
- 12) 貫井武、岡林正俊：アスファルト混合物の劣化評価指標の検討、第 26 回日本道路会議、No. 120147、2005。
- 13) 西澤辰男、松野三郎：アスファルト舗装の車輪走行位置に生ずる縦表面ひび割れについて、土木学会論文集、No.478/V-12、pp. 71-80、1993。

参考文献

- 1) (一社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報、p.22-23、2019。
- 2) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、2019。
- 3) 田湯文将、新田弘之、川島陽子、川上篤史：アスファルトの繰り返し再生に適した再生用添加剤選定における省力化の検討、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.75、舗装工学論文集第 24 巻、I_209-I_214、2019。
- 4) (公社)石油学会：TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験方法、石油学会、JPI-5S-70-10、2010。

9.2 リサイクル材等の環境安全向上技術の構築

9.2.1 循環型社会に向けた舗装リサイクル技術に関する研究

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：新田弘之（上席）、川島陽子

【要旨】

近年、アスファルトフェームに関わる作業者の健康リスクの観点から、リスク軽減技術が求められており、その1つとして中温化技術が期待されている。日本では、アスファルト混合物の出荷量のうちおよそ75%が再生アスファルト混合物であることから、中温化技術の普及には再生アスファルト混合物への適用が必須である。しかし、通常のアスファルト混合物に対して中温化技術はほとんど適用可能になっているものの、再生アスファルト混合物ではまだ一般的に適用可能となっておらず、製造手法や品質規格の確立には至っていない。そのため、本研究プログラムでは再生アスファルト混合物への中温化技術の適用拡大を目指して、再生骨材や混合物の品質に応じた適用条件等を明らかにしていく。

令和元年度は、国内で製造可能な複数の再生中温化アスファルト混合物の圧裂試験や高温カンタプロ試験を実施し、初期性状について調査した。また、促進劣化による再生中温化アスファルト混合物の性状変化について調査した。その結果、圧裂係数や高温カンタプロ損失率などの性状に対する中温化の影響は小さく、それらの性状は新規アスファルト混合物と同等であると考えられた。また、促進劣化による再生中温化アスファルト混合物の性状変化も新規の混合物と同程度である可能性が示唆された。

キーワード：中温化技術、再生アスファルト混合物、アスファルトフェーム

1. はじめに

近年、アスファルトフェームに関わる作業者の健康リスクの観点から、リスク軽減技術が求められており、その1つとして中温化技術が期待されている。日本では、アスファルト混合物の出荷量のうちおよそ75%が再生アスファルト混合物であることから、中温化技術の普及には再生アスファルト混合物への適用が必須である。しかし、通常のアスファルト混合物に対して中温化技術はほとんど適用可能になっているものの、再生アスファルト混合物ではまだ一般的に適用可能となっておらず、製造手法や品質規格の確立には至っていない。そのため、本研究プログラムでは再生アスファルト混合物への中温化技術の適用拡大を目指して、再生骨材や混合物の品質に応じた適用条件等を明らかにしていく。

令和元年度は、国内で製造可能な複数の再生中温化アスファルト混合物の圧裂試験や高温カンタプロ試験を実施し、初期性状について調査した。また、促進劣化による再生中温化混合物の性状変化について調査した。

2. 再生中温化アスファルト混合物の製造実態

2.1 概要

中温化技術とは製造・施工温度を通常より低減させる

ことのできる技術である。当研究グループでは、より製造温度の低減効果の高い中温化技術や、リサイクル材の使用による中温化剤の開発などを実施してきた¹⁾²⁾。しかし、再生アスファルト混合物への適用性や評価手法については未だ確立に至っていない。また、現状の中温化技術の適用性やどの程度まで温度を下げられるか等、現状での実績についての知見も十分ではない。そこで、全国のアスファルト合材プラントにアンケート調査を実施し、再生中温化アスファルト混合物の製造実態や、現状での課題抽出を行った。なお、アンケート調査は(一社)日本アスファルト合材協会との共同研究の一部として実施した。

2.2 調査内容

調査対象は全都道府県のアスファルト合材プラントであり、905工場を対象とした。集計期間は平成28年4月から平成29年3月までとした。調査にあたっては、次の項目についてアンケートを実施した。

- ・ 再生中温化技術の実績の有無
- ・ 再生アスファルト混合物の製造投機の形式
- ・ 中温化技術の種類
- ・ 中温化アスファルト混合物の出荷数量(t)
- ・ 再生骨材配合率(%)

- ・ 再生骨材の加熱温度
- ・ 新規骨材の加熱温度
- ・ 出荷能力の変化
- ・ 製造目的(施工性改善 or 中温化)

2.3 調査結果

アンケート調査において、調査数905に対して回収790工場(回収率87.3%)であった。その中で、再生アスファルト混合物を中温化で製造した実績のある工場はわずか65工場であり、回答した全工場に占める再生中温化技術の実績は8.2%であった。全国的に再生アスファルトの製造経験がある合材プラントが少ないと言える。各地方毎のデータ集計値を表-1に示す。アンケートにて得られた回答について、詳細を記す。

(1) 製造投機の形式

併設加熱方式とは、新規骨材を用いるバッチ式プラントに併設して再生骨材専用の骨材供給設備および加熱用ドライヤを設置した製造投機である。多くのプラントで併設加熱方式を採用しており、間接加熱、連続式はわずかであった。

(2) 中温化技術の種類

ここで中温化技術の種類とは、主に中温化剤の種類を指す。半数以上が滑剤系の中温化剤を使用しており、次いで発泡系中温化剤を使用が4割を占めていた。

(3) 出荷数量

1,000 t未満(未回答含む)の合材プラントが多かった。最も出荷量の多い合材プラントは13,500tという回答であった。

(4) 再生骨材配合率

再生骨材配合率の全国平均はおよそ40%であった。再生骨材配合率30%以下の合材プラントよりも31%~60%合材プラントの方が多く、半数以上を占めていた。最大でも再生骨材配合率は65%であり、通常のアスファルト混合物に比べると、再生骨材配合

率が抑えられていた。地方毎の再生骨材配合率の平均を比較すると、関東地方が52.8%と最も高かった。

(5) 製造目的(施工性改善/中温化)

出荷温度が全平均値に比べて、20℃以上低い場合にはCO₂排出量削減を目的としたものとして中温化、20℃未満の場合には施工性改善を目的としたものとして分類した。アンケートから、施工性改善の要望が多いという回答が得られており、中温化再生アスファルト混合物の製造実績のある合材プラント内の8割以上が施工性改善を目的として中温化再生アスファルト混合物を製造していた。

(6) 再生骨材、新規骨材の加熱温度

再生骨材の加熱温度の全国平均は157℃であった。なお、最大温度は190℃ありかなり高温であると言える。一方、新規骨材の加熱温度について、全国平均は184℃である。再生中温化アスファルト混合物の出荷温度を計算(出荷温度=新規骨材の加熱温度×新規骨材配合率+再生骨材の加熱温度×再生骨材配合率)したところ、平均温度が170℃であった。つまり、施工性改善を目的とした製造が多いこともあり、加熱温度の低減効果はあまり見られない。アスファルトフェームのリスク低減のことを考慮すると、加熱温度の低減が進むような中温化技術の普及が今後望まれる。

(7) 出荷能力の変化

出荷能力について、“通常通り”という回答が多かったが、能力が低下したという回答が2割弱得られた。この要因として、温度管理や投入手間にかかわるロスが要因として考えられるが、引き続き検討が必要である。

(8) 再生中温化技術に対する懸念事項

中温化剤の投入の時間を問題視する声が多く、次いでバグフィルタの結露への懸念が見受けられた。アスファルトフェーム対策だけでなく、こうした問

表-1 アンケートの集計結果

地区	実績工場数	製造投機の形式			中温化技術の種類				出荷数量		再生骨材配合率				目的		再生骨材加熱温度平均	新規骨材加熱温度平均	計算上の出荷温度平均
		併設加熱	間接加熱	連続式	滑剤系	発泡系	粘弾調整系	その他	~999t	1,000t以上	0~30%	31~60%	61%以上	平均	施工性	中温化			
北海道	9	7	2	0	3	6	0	0	6	3	5	4	0	36.7%	6	3	149	193	175
東北	17	17	0	0	7	10	0	0	15	2	7	10	0	40.0%	15	2	160	186	165
関東	10	7	1	2	5	3	0	2	9	1	3	6	1	52.8%	10	0	164	188	176
北陸	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	50.0%	1	0	150	200	200
中部	7	7	0	0	3	4	0	0	5	2	4	3	0	36.1%	5	2	158	165	161
近畿	3	3	0	0	1	1	1	0	2	1	1	2	0	40.0%	3	0	170	198	190
中国	6	6	0	0	6	0	0	0	5	1	4	2	0	26.7%	6	0	153	178	168
四国	5	5	0	0	4	1	0	0	3	2	0	5	0	48.0%	4	1	162	171	168
九州	6	5	1	0	4	2	0	0	5	1	3	3	0	37.5%	5	1	147	181	169
沖縄	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	40.0%	1	0	150	180	168
合計	65	59	4	2	34	28	1	2	52	13	27	37	1	39.7%	56	9	157	184	170

題に対しても対応していくことが、中温化技術の普及につながるものと考えられる。

3. アスファルトフェームの室内測定手法の検討

3.1 概要

平成 23 年に国際ガン研究機関(IARC)はアスファルトの発がん性について再評価を行い、「道路舗装におけるアスファルトおよびアスファルトフェームの職業暴露」等について「グループ 2B (人に対して発がん性があるかもしれない)」に引き上げた。また、我が国においては、平成 30 年度内にストレートアスファルトの安全データシート (SDS) において、フェーム暴露の時間加重平均 (TWA) 値が記載される予定である。作業員の健康リスク低減のためにはアスファルトフェームの排出量を削減することが必要である。既往研究より、製造温度の低減により、発生ガス内の有機物が減少することが知られており、製造・施工温度を低減可能な中温化技術の適用拡大が期待される。しかし、実際にどの程度アスファルトフェームの削減効果があるのか、また、測定手法については十分な検討が進んでいないのが現状である。そこで、平成 28 年度に、室内でのアスファルトフェームの測定手法を検討し、混合温度低減による粒子状物質の削減効果について検証した。

3.2 既往研究

アスファルトには少量の揮発性、半揮発性の有機化合物が残存しているため、加熱して液体状になったアスファルトからは、微量の有機化合物がアスファルトフェームとして発生する。フランスの LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées、現 IFSTTAR) では、アスファルト混合物から発生する有機化合物の排出量についての研究が行われており、アスファルト混合物から発生する物質を図-1 のように分類した³⁾。海外の既往研究では、室内試験にて、混合時の攪拌強度や温度と TOC(e)の発生量との相関について報告されているものが多い。また、屋外作業員に吸着管等を取り付けて、作業中の全粒子状物質 (以下、TPM)やベンゼン可溶性成分(以下、BSM)および多環芳香族化合物(以下、PAHs)の分析結果についても報告されている⁴⁾。本研究では、この論文と同様に、アメリカの国立労働安全衛生研究所(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)の手法⁵⁾や ASTM⁶⁾に準拠し、室内でのアスファルトフェームの測定方法を検討し、TPM や BSM の発生量を測定した。

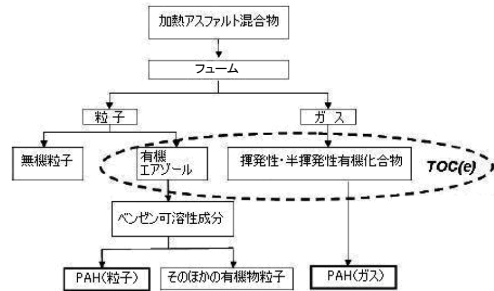


図-1 アスファルト混合物から発生する物質

3.3 方法

3.3.1 試料

測定にはストレートアスファルト 60/80(以下、StAs)を使用した。アスファルト混合物の配合を表-2 に示す。小型の攪拌機を使用するため、強度等を考慮して 5mm トップの配合とした。骨材および StAs は試験前に予めそれぞれ 165°Cおよび 135°Cの恒温槽内で事前加熱した。

表-2 骨材配合

骨材	割合(%)	重量(g)
7号	48	1152
碎石	27	648
粗砂	13	312
細砂	6	144
石粉	6	144
StAs	5.6	142.4
合計(骨材)	100	2,400

3.3.2 装置

アスファルトフェームの測定系として、アスファルト混合物の混合槽およびフィルタ等の吸着管、ポンプの接続の様子を写真-1 に示す。2枚羽の攪拌羽にてアスファルト混合物を加熱混合した。また、混合槽に蓋をしてアスファルトフェームの拡散を防ぐようにし、蓋にはPTFE フィルタ (2μm 孔)、吸着管を接続した。吸着管の先に接続したポンプにより、アスファルト混合物の加熱中に発生するガスを吸引し、フィルタに捕捉される粒子状物質や吸着管に捕捉される物質を解析する。なお、流量は 2 L/min とした。平成 28 年度にて、アスファルトフェームとして、フィルタに残留した TPM や BSM の量を検証した。

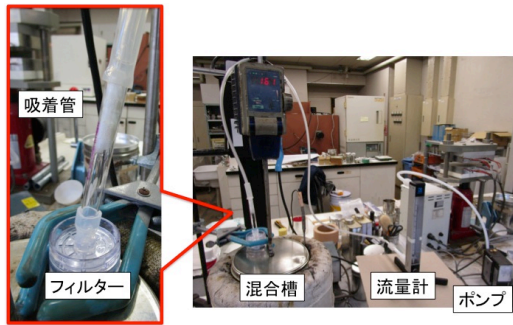


写真-1 アスファルトフューム測定系の様子

3.3.3 測定手順

- 1) ガラス器具類および $2\mu\text{m}$ 孔フィルタ(PTFE)を事前にジクロロメタンで洗浄した。
- 2) 骨材および StAs を一定温度で混合した。
- 3) 十分に混合したところで、フィルタ、吸着管およびポンプを接続した
- 4) 一定温度にて混合槽を保温し、攪拌しながら 24 時間吸引した。
- 5) フィルタの重量を測定し、TPM の重量を算出した。
- 6) フィルタを試験管内に移し、ベンゼン 5mL につけ込み、20 分間超音波にかけた。
- 7) ベンゼンを $0.45\mu\text{m}$ 孔シリンジフィルタにてろ過した。
- 8) ろ過したものをアルミカップに移し、 40°C 、 $7\sim 27\text{kPa}$ 下で真空吸引した。アルミカップの重量を測定し、BSM の質量を算出した。

3.4 結果

3.4.1 フィルタの目視観察

混合温度を変えてアスファルトフュームを測定した際のフィルタの様子を表-3 に示す。混合温度が高い場合、フィルタ全体が油っぽくなり、全体的に黄色くなっていることを確認した。また、 160°C では中央部でタールと思われる黒い粒子が付着していた。さらに温度を下げると、フィルタに目視観察で確認できるものは付着しておらず、油っぽさも見られなかった。

3.4.2 TPM および BSM 量の温度依存性

吸引前後のフィルタ重量から算出した TPM および BSM 濃度を図-2 に示す。混合温度の低減に伴い、TPM および BSM の濃度が下がった。そのため、中温化技術による製造温度低減により、アスファルトフュームの排出量削減効果は十分見込めるものと考えられる。本研究で得られたそれぞれの濃度は既往研究に比べると高い値

を示しているが、これは文献のような屋外での吸引ではなく、温度の影響を明確に求めるために密封した容器から直接採取したことによる。また、NIOSH の規定にある「暴露限度を 15 分間に $5\text{mg}/\text{m}^3$ 」より十分に低い値と言える。

本研究ではアスファルトフュームの量的な解析を主に行ってきたが、今後はフィルタや吸着管に捕捉された物質の質的な解析も併せて実施する予定である。

表-3 アスファルトフューム吸引後のフィルタの状態

混合温度	フィルタ	状態
— (採取前)		
130°C		見た目の変化なし
160°C		端部が黄色くなり、中央が黒ずむ
190°C		熱によりフィルタ全体がしなった状態 全体的に黄色く、中央が黒ずむ

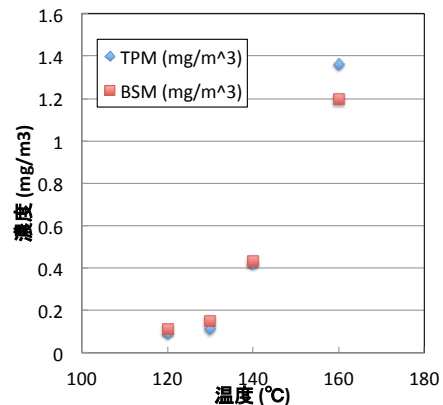


図-2 TPM および BSM 濃度

4. 再生アスファルト混合物から発生するアスファルトフューム発生量の検証

4.1 概要

平成 28 年度に実施した室内試験は、攪拌機が小型であることや、攪拌子やモータの能力が小さく、アスファルト混合物を十分に攪拌できない等の問題点があった。そこで、平成 29 年度では、攪拌強度が高く、アスファルト混合物を数 kg 単位で混合可能な試験機を活用して再検

討を行った。また、組成の異なる再生用添加剤を使用した再生アスファルト混合物から発生するアスファルトフェウム量を調べ、BSM 量に対する再生用添加剤の影響を検証した。

4.2 方法

4.2.1 試料

StAs は「3.アスファルトフェウムの室内測定手法の検討」と同様のものを使用した。再生用添加剤（以下、添加剤）には、芳香族分が多い添加剤（以下、添加剤 A）と飽和分が多い添加剤（以下、添加剤 B）の 2 種類を使用した。使用材料の性状を表-4 に示す。また、アスファルト混合物の作製条件を表-5 に示す。

表-4 使用材料の性状

	ストレートアスファルト 60/80		添加剤A		添加剤B	
	密度 (g/cm ³)	針入度 (1/10mm)	密度 (g/cm ³)	アスファルトテン分	レジン分	芳香族分
密度 (g/cm ³)	1.037	70	0.975	0.1	0	
針入度 (1/10mm)	70	組成 (%)		6.1	2.5	
軟化点 (°C)	46.5			88.1	47.7	
伸度 (cm)	100+			5.7	49.9	
			飽和分			

表-5 アスファルト混合物の作製条件

混合物種類 3種類	密粒度アスファルト混合物 (13)	新規混合物	
		添加剤Aを用いた再生混合物	添加剤Bを用いた再生混合物
再生混合物の再生材配合率 (%)		60	
アスファルト量 (%)		5.7	
再生材の旧アスファルト量 (%)		3.03	
再生用添加剤投入量	添加剤A	18.6	
旧アスファルト比 (%)	添加剤B	15.0	
旧アスファルトの再生後針入度 (1/10mm)		70	

4.2.2 アスファルトフェウム採取方法

アスファルトフェウムの発生量を測定するために、写真-2 に示すパグミル混合機を使用した。採取用フィルタと定量ポンプ等を接続し、混合物を攪拌中に吸引を行い、混合物から発生するアスファルトフェウムを採取した。なお、ASTM D6494-99 および NIOSH 5042 を参考に表-6 に示す条件で行った。また、吸引条件を均一に近づけるために、アスファルト混合物の混合後も攪拌を継続し、フェウムの採取時間は、混合後の攪拌開始 15 分から 45 分までの 30 分間とした。

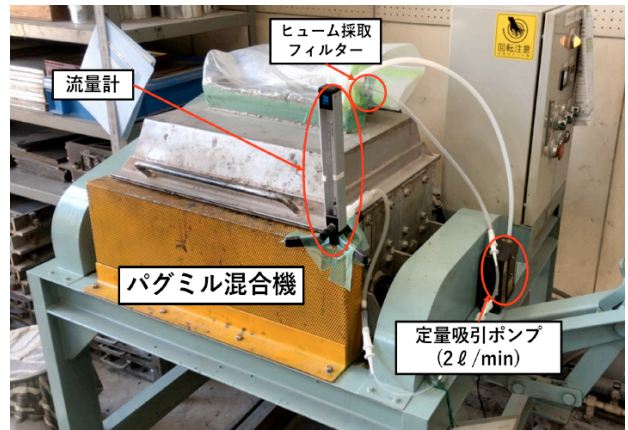


写真-2 アスファルトフェウムの採取状況

4.3 結果

4.3.1 BSM 量

図-3 に各混合物における BSM の量を示す。いずれの混合物においても温度が低下することで BSM の量が大幅に低下していることが分かった。同温度帯で比較すると、添加剤を用いた再生アスファルト混合物は、新規アスファルト混合物よりも BSM の量が多く、160°C では、2 倍程度の差が見られた。このことから、添加剤を用いた再生混合物の場合は、添加剤そのものから相当量の BSM が発生したものと考えられる。また、130°C において、再生用添加剤の種類によって BSM 量に違いが見られた。ただし、両者の BSM 量は 160°C では逆転しており、明確な差について議論するには、より詳細な検証が必要である。

表-6 アスファルトフェウム採取の試験条件

混合物種類 3種類	密粒度アスファルト混合物 (13)	新規混合物	
		添加剤Aを用いた再生混合物	添加剤Bを用いた再生混合物
アスファルト量 (%)		5.7	
再生材の旧アスファルト量 (%)		3.03	
再生用添加剤投入量	添加剤A	18.6	
旧アスファルト比 (%)	添加剤B	15.0	
再生材配合率 (%)		60	
混合温度 (°C)		110, 130, 160	
混合物作製時の混合時間 (min)		3	
ヒュームの吸引時間 (min)		30 (混合後15分から45分まで)	
吸引流量 (ℓ/min)		2.0	
吸引時の状態		混合物を攪拌状態	
採取フィルタ	種類	メンブレンフィルタ PTFEサポート	
	細孔 (μm)	1.0	
	直径 (mm)	37.0	

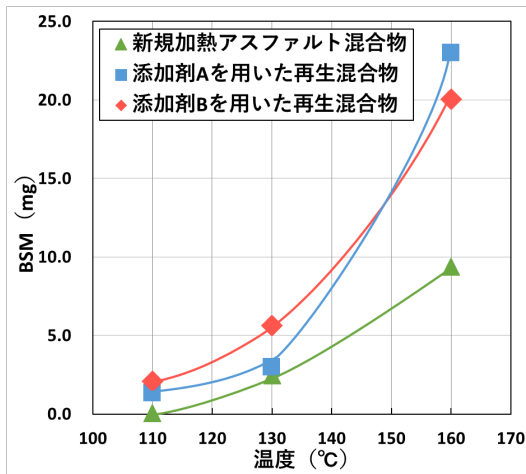


図-3 各混合物から採取したBSM量

4.3.2 再生骨材からのアスファルトフェーム量

再生用添加剤を含まない再生アスファルト混合物から発生するアスファルトフェーム量を調査した⁷⁾。結果を図-4に示す。なお、図-3の結果に示す混合物とは異なる再生骨材を使用している点に留意する。各混合物において、有機溶剤可溶分(図中、OSM)は5~6mg程度であった。図-3で示した通り、再生用添加剤を含んだ場合、新規アスファルト混合物と再生アスファルト混合物では発生量に2倍近い差があった。しかし、これと比較すると、再生用添加剤を含まない再生アスファルト混合物からの発生量は新規混合物とほとんど差がないと言える。そのため再生骨材、つまり旧アスファルトから発生するアスファルトフェーム量は新規混合物と同程度であることから、再生アスファルト混合物でのアスファルトフェーム発生量の増大は再生用添加剤からの発生に起因しているものと推測された。

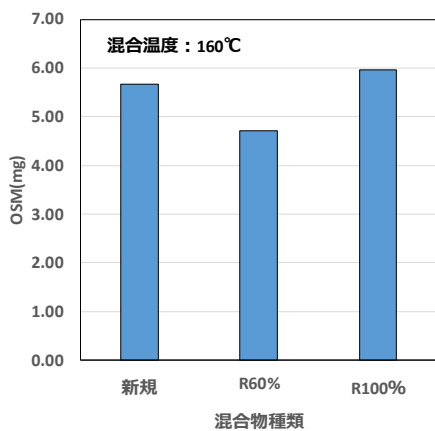


図-4 再生アスファルト混合物からのアスファルトフェーム量

5. アスファルトフェーム抽出のための溶媒検討

5.1 概要

現在、アスファルトフェームの発生量は、気中に発散したアスファルトフェームをフィルタで捕捉し、フィルタに付着したものでベンゼンに溶解する物質量をベンゼン可溶分として測定し、評価指標としている。しかし、ベンゼンは第2種特定化学物質に指定されており、使用者の健康障害を発生させる可能性が高いため、使用には十分な安全措置を講じる必要がある。そこで、アスファルトフェームをより安全な方法で分析するために、ベンゼンの代替溶媒として同程度の可溶性を有し、取扱いやすい溶媒の検討を行った。

5.2 方法

5.2.1 試料

4章と同様の3種類のアスファルト混合物から発生したアスファルトフェームを、同様の方法で採取したものを試料とした。なお、試料数はn=3とした。アスファルトフェームの抽出にはベンゼン、トルエンおよびメチルエチルケトン(以下、MEK)を使用した。トルエンは、ベンゼンと比較して取扱いしやすく、同程度にアスファルトを溶解することが可能である。しかし、ベンゼンよりも揮発しにくいという問題点がある。一方、MEKは、コールタール成分の測定においてベンゼンの代替物として指定されているため、アスファルトフェームの抽出溶媒の代替品として候補に挙げた⁸⁾。

5.2.2 抽出手順

1つのフィルタを分割し、それぞれのフィルタを3種類の有機溶媒にてアスファルトフェームを抽出し、どの程度の可溶分が得られるか調べた。抽出手順を図-5に示す。アスファルトフェームが付着したフィルタを等分に切断し、有機溶媒5mLとともにそれぞれ試験管内に移し、20分間超音波処理を行った。抽出以降の手順は「3.3.3測定手順」の7)および8)に準拠し、可溶分の質量を測定した。なお、ベンゼン以外の溶媒は、ベンゼンと同条件で揮発するとは限らないため、有機溶媒が十分に揮発するように、40°Cで2時間揮発させた後、さらに80°Cで30分間加熱した。

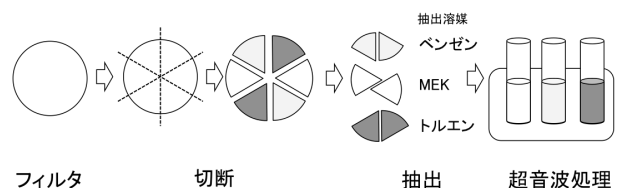


図-5 抽出手順

5.3 結果

3種類の溶媒によるアスファルトフュームの可溶分の質量を測定した。フィルタに付着したアスファルトフュームの質量は、フィルタを切断し、分割する際に若干差が生じる。今回は、ベンゼンの代替溶媒を検討するために、フィルタ分割による質量誤差を、ベンゼンを基準として補正を行った。それぞれの抽出溶媒により得られた可溶分の相関関係を図-6に示す。なお、図中の再生A、再生Bはそれぞれ再生用添加剤AおよびBを用いた再生アスファルト混合物を表す。トルエンとMEKでは、ベンゼンとの相関係数に違いはほとんどなかったが、45度線に近いトルエンの方が、ベンゼンに近いと考えられた。以上より、ヒューム抽出の代替溶媒としてトルエンが適していると判断した。

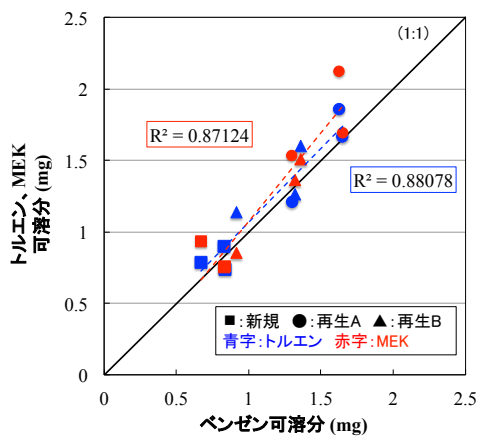


図-6 有機溶剤可溶分の相関

6. 屋内作業におけるアスファルトフューム暴露量の検証

6.1 概要

これまでの、混合温度の低減によるアスファルトフューム発生量の抑制効果を検証してきた。本研究では、室内にてアスファルト混合物を作製する際に発生するアスファルトフューム量を測定し、室内作業における作業員の安全性の評価を試みた⁹⁾。

6.2 試験概要

6.2.1 採取条件

再生アスファルト混合物を作製している試験室内でアスファルトフュームを採取した。発生量の比較のため、混合温度は165°C、150°Cおよび135°Cとした。採取対象は作業員3名および作業環境とした。作業員には、写真-3に示すように、胸元近くにフィルタを取り付けてもらい、アスファルト混合物作製中のアスファルトフューム

を採取した。なお、各作業員の作業内容は表-6に示す通りである。また、作業環境については、アスファルト混合物を混合するパグミルの他に、供試体を作製する際に発生するアスファルトフューム量も計測するため、試験機や作業台の近傍にフィルタを設置した。設置したフィルタの様子を写真-4に示す。また、作業員および作業環境のアスファルトフュームを採取するのに使用したフィルタの種類も併せて表-7に示す。なお、各混合温度における作業時間はおよそ5時間であり、ヒューム採取時のポンプ流量は4L/minとした。

6.2.2 抽出条件

抽出手順は「3.3.3 測定手順」と同様である。なお、抽出溶剤としてトルエンを使用した。

6.3 結果

図-7に各作業員および作業環境におけるトルエン可溶分の時間加重平均(TWA)値を示す。混合温度の低減によるトルエン可溶分の削減効果は認められなかった。作業環境のトルエン可溶分については、パグミルや作業台近傍で可溶分が多く、混合物の練り混ぜに関わる作業においてアスファルトフューム量が多いものと推察された。なお、SDSに記載されている許容濃度は0.5mg/m³であるため、本試験のトルエン可溶分は許容値と比べて1/3以下であり、安全上問題ないと判断された。

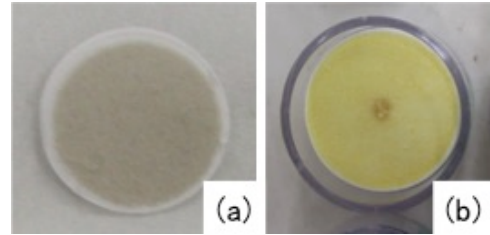
図-8に全粒子状物質(TPM)量のTWA値に対するトルエン可溶分のTWA値を示す。作業環境については、TPM量が増えるとトルエン可溶分も増加する傾向にあった。一方、作業員については、TPMのTWA値が増えても、トルエン可溶分は横ばいに推移し、増加する傾向は見られなかった。図-9にアスファルトフューム採取後のフィルタを示す。比較のため、作業員Bのフィルタと第4章の試験で得られたフィルタを併せて示す。第4章では、有機溶剤可溶分が多かったため、フィルタが黄色に変色していたが、本試験の作業員のフィルタは褐色になっていた。これは、骨材等の投入や道具類の洗浄などに起因するほこりが捕捉されていたことを表している。このため、TPM量が多いもののトルエン可溶分は増加しなかったものと考えられた。したがって、作業内容によってはTPMの暴露量が多くなる可能性があるが、必ずしも有機溶剤可溶分の増加にはつながらないことが示唆された。



写真-3 作業員用フィルタ



写真-4 作業場近傍の
フィルタ設置状況



(a)作業員 B (b)4章の試験で採取されたフィルタ

図-9 フィルタの様子

表-7 作業概要

対象	内容	フィルタ種類
作業員	作業員A As、添加剤投入 MS作製 等	PTFEバインダー フィルタ(TF98)
	作業員B 骨材など投入 転圧 等	
	作業員C 骨材計量、運搬 備品類の清掃 等	
作業環境	バグミル アスファルト混合 物の練り混ぜ	TF98/PTFEメン ブレンフィルタ(孔径 2.0μm)
	コンパクタ 供試体の転圧	
	マーシャル (MS)作製台 MS供試体を作製 する作業台	

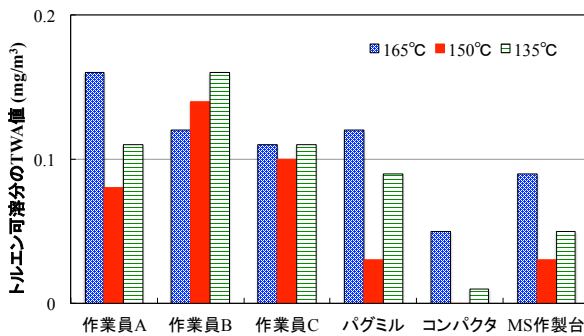


図-7 トルエン可溶分のTWA値

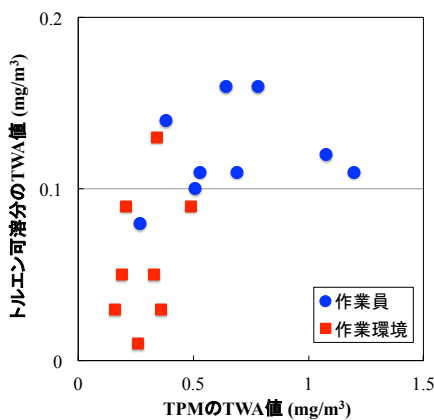


図-8 トルエン可溶分のTWA値

7. 国内で流通する再生中温化アスファルト混合物の性状評価

7.1 概要

本稿第2章にて、再生アスファルト混合物へ中温化技術の適用の現状として、プラントの能力や製造実態について報告した。それぞれのプラントで採用している中温化技術が異なるだけでなく、新規材料や再生骨材も異なる。そのため、素材や配合設計が異なる中での、再生中温化アスファルト混合物の性状差異について傾向を掴む必要がある。そこで本章では、国内で製造可能な再生中温化技術の実態調査として、圧裂試験や高温カンタプロ試験を実施し、各再生中温化アスファルト混合物の初期性状を調査した。

7.2 試験概要

7.2.1 試料

供試体の作製条件を表-8に示す。なお、再生骨材配合率を60%、設定針入度60-80、混合物配合は密粒度(13)とした。供試体の種類毎に、新規材料や再生骨材が異なっているため、混合物を作製する際の通常温度には多少幅があり、混合温度は160~150°C、締固め温度は140~130°Cであった。中温化の場合は通常温度よりも20°C低い設定とした。

中温化技術は大きく分けて2種類とし、中温化剤を使用したもの(供試体A~C)とフォームドアスファルトを使用したもの(供試体D、E)である。ただし、供試体Bはアスファルトにプレミックスしたものを用いた。また、再生用添加剤については、ここでは飽和分が多い添加剤(飽和分系)と芳香族分が多い添加剤(芳香族系)で大別した。締固め度は、試験に使用したマーシャル供試体12個の締固め度の平均値を示した。中温化しても100%近い締固め度が得られていた。

7.2.2 性状試験

再生中温化アスファルト混合物の性状試験として、圧裂試験および高温下でのカンタプロ試験(高温カンタプロ試験)を行った。圧裂試験は舗装調査・試験法便覧

表-8 混合物の作製条件

供試体名	中温化技術		針入度		As量		再生用添加剤		締固め度	
	種類	添加量 (対As量 %)	旧 As	新 As	再生 As量	新As 量	種類	添加量(対 As量 %)	通常 混合物	中温化 混合物
供試体A	中温化 剤	0.5	21	70	5.6	2.70	飽和分系	6.6	100.7	100.3
供試体B		(プレミック ス)	23	72	5.7	1.85	芳香族系	22.5	99.7	99.1
供試体C		1.5	23	71	5.7	1.85		22.5	100.4	99.9
供試体D	フォーム ド	-	25	67	5.6	1.68	飽和分系	12.0	100.5	99.7
供試体E		-	21	70	5.5	2.38	芳香族系	19.9	99.8	99.3

(B006)に準拠し、試験温度 0℃、20℃および 60℃で実施した。一方、高温カンタブロ試験は、既往研究¹⁰⁾に基づき供試体温度を 60℃、試験機内温度を 30℃として実施した。なお、試験手順は舗装調査・試験法便覧(B010)に準拠した。

7.3 結果

7.3.1 圧裂試験

図-10 から図-12 に圧裂試験(20℃)の結果を示す。また、比較のために、通常温度で作製した新規アスファルト混合物(図中、新規)の値を併記した。同じ製造温度で作製した新規アスファルト混合物と再生アスファルト混合物の性状には差が見られるが、中温化による性状差異はわずかであり、中温化による性状への影響は小さいと考えられた。

図-13 に圧裂強度比を示す。供試体によっては、新規アスファルト混合物と同程度の圧裂強度比を示すものもあったが、全体的には新規よりやや低い値を示した。その中でも飽和分系の再生用添加剤で再生したものが低かった。このため、飽和分系を使用すると感温性が小さくなると見られるが、その差はわずかであり、さらなる調査が必要と考えられた。また、中温化技術による増減の変化は一律ではなく、一定の傾向は見られなかった。

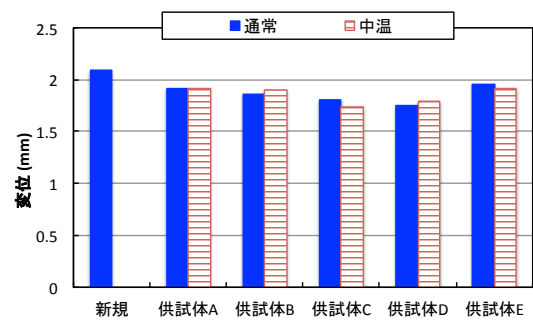


図-11 圧裂変位

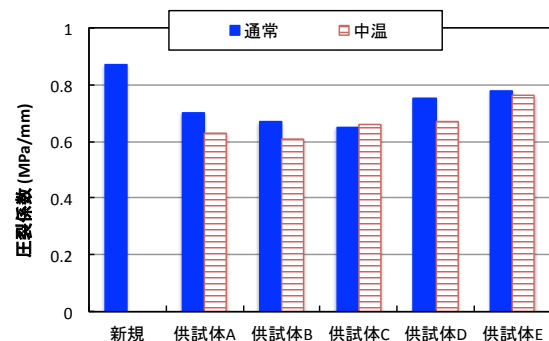


図-12 圧裂係数

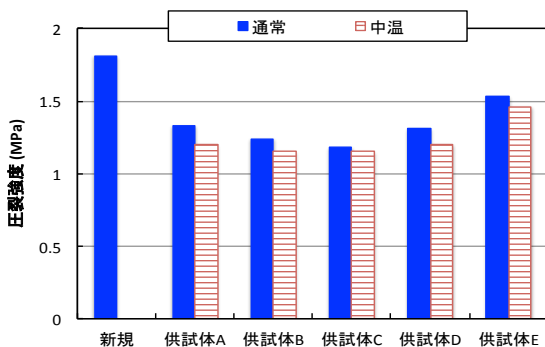


図-10 圧裂強度

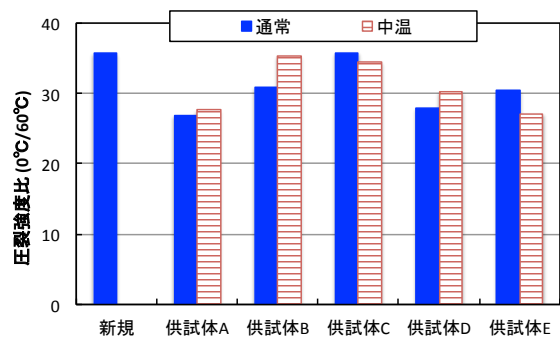


図-13 圧裂強度比(0℃/60℃)

7.3.2 高温カンタプロ試験

高温カンタプロ損失率は、繰り返し再生した回数や使用する再生用添加剤の種類によって変動し、疲労破壊抵抗性と相関があることが報告されている¹⁰⁾。図-14 に再生中温化アスファルト混合物の高温カンタプロ損失率を示す。供試体 A のみカンタプロ損失率が高く、他の供試体は1%未満で低い値となった。また、供試体 A 以外では、中温化した供試体では損失率が多少増加する傾向が見られたが、新規と比べても同程度であり、疲労破壊抵抗性に問題はないと考えられた。

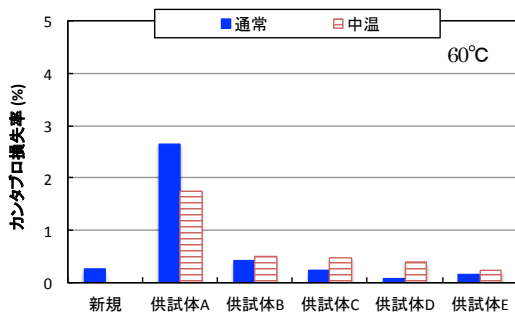


図-14 高温カンタプロ損失率

8. 促進劣化を施した再生中温化混合物の性状評価

8.1 概要

前章では、国内で製造可能な再生中温化アスファルト混合物の初期性状を調査した。しかし、供用中の耐久性を確保できるかを評価するためには、初期性状だけでは判断できない。そこで、室内での促進劣化試験を行い、劣化に伴う再生中温化アスファルト混合物の性状変化を調査した。

8.2 試験概要

8.2.1 試料

混合物の種類など、供試体作製条件を表-9 に示す。また、再生アスファルト中の旧アス量や再生用添加剤の添加割合などについては表-10 に示す通りである。再生用添加剤は組成の異なるものを2種類使用した。なお、再生用添加剤は表-11 に示す通り、芳香族分の多いものと飽和分の多いものの2種類を使用した。

表-9 供試体作製条件

種類	混合物配合	混合温度(°C)	再生骨材配合率(%)
新規混合物	密粒度(13)	165	-
再生混合物		165	50
再生中温混合物		150,135	

表-10 再生アスファルトに関わる性状

項目	性状	
旧アスファルト針入度 (1/10mm)	22	
再生アスファルト針入度 (1/10mm)	70	
再生用添加剤量 (旧アス比)(%)	再生用添加剤 A	22.5
	再生用添加剤 B	20.7
アスファルト量 (%)	5.7	
旧アスファルト量 (%)	2.5	

表-11 再生用添加剤の性状

項目	添加剤 A	添加剤 B
密度(g/cm ³)	0.95	0.9083
組成 (%)	アスファルテン分	0.5
	レジン分	2.6
	芳香族分	63.6
	飽和分	33.3
		79.0

8.2.2 劣化試験

促進劣化試験として、表-9 および表-10 の条件で作製したマーシャル供試体を 110°Cの恒温槽内にて所定の期間養生した。養生期間は既往研究¹¹⁾を参考にして、0日、7日、14日間とした。養生に際し、供試体が崩れるのを防ぐために、マーシャル供試体をメッシュ状のアルミシートで覆い、ホースバンドで固定した。

8.2.3 性状試験

アスファルト混合物の性状試験として、20°Cの圧裂試験及び20°C、60°Cのカンタプロ試験を行った。なお、それぞれの試験は舗装調査・試験法便覧(B010、B006)の方法に準拠した。

8.3 結果

8.3.1 圧裂試験

各混合物の締固め度を表-12 に示す。表中の混合物名に、再生アスファルト混合物には再生用添加剤(A もしくは B)および混合温度を併記した。添加剤 A を使用した場合、混合温度が下がると締固め度が若干低下する傾向にあった。一方、飽和分の多い添加剤 B の場合ではいずれの混合温度でも、高い締固め度を確保できた。

圧裂試験の結果を図-15 から図-17 に示す。図-15 より、添加剤 A により再生した混合物(以下、再生混合物 A とする)では、劣化 14 日後の圧裂強度が高くなっており、新規混合物と似た挙動を示していた。一方、添加剤 B により再生した混合物(以下、再生混合物 B)は圧裂強度の変化は小さかった。図-16 より、圧裂変位が劣化 14 日後には小さくなる傾向を示した。圧裂強度と同様に、新規

と再生混合物Aでは圧裂変位の低下傾向が類似しており、再生混合物Bでは変化が小さかった。図-17に圧裂係数を示す。圧裂係数は、圧裂強度を圧裂変位で除した値であり、再生混合物Aと再生混合物Bの違いが大きくなった。つまり、圧裂強度や圧裂変位の変化が大きかった再生混合物Aでは圧裂係数が大きくなり、再生混合物Bでは値が小さかった。劣化14日後の混合物からアスファルトを抽出回収し、針入度を測定したところ、図-17に示すように、再生混合物Bの針入度は高く、再生混合物Aの針入度は低くなった。これは、締固め度の差により、劣化しやすさに差が生じたものと考えられた。そのため、今後締固め度を統一して試験を行う。

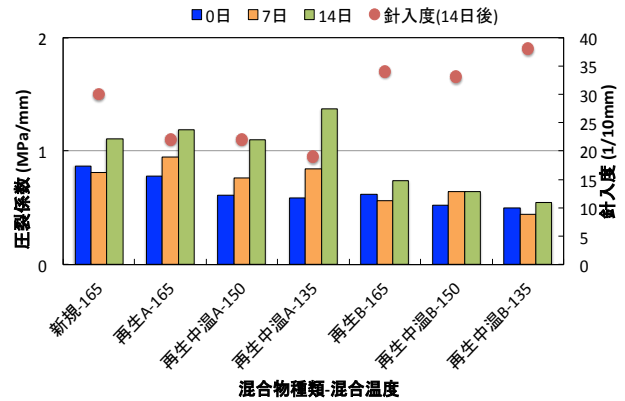


図-17 圧裂係数

表-12 締固め度

混合物名	混合温度 (°C)	締固め温度 (°C)	締固め度平均 (%)
新規混合物	165	150~145	100.0
再生 A-165	165	150~145	100.0
再生中温 A-150	150	130	99.4
再生中温 A-135	135	115	98.6
再生 B-165	165	150~145	100.0
再生中温 B-150	150	130	99.7
再生中温 B-135	135	115	99.8

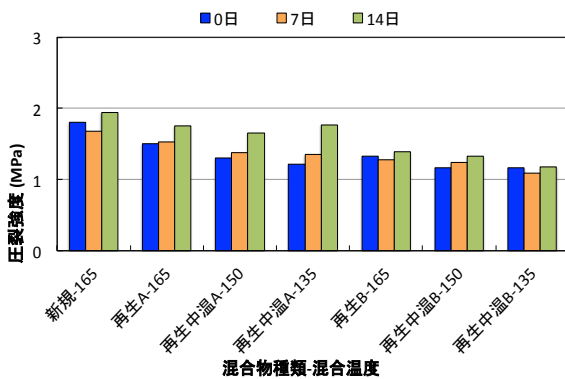


図-15 圧裂強度

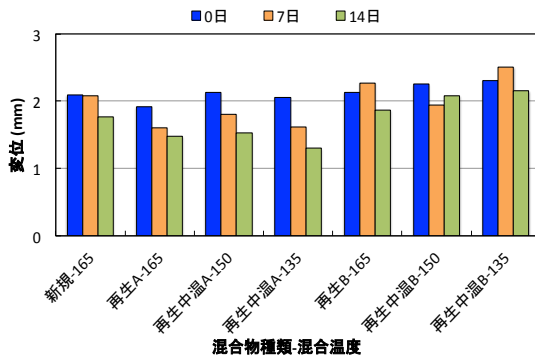


図-16 圧裂変位

8.3.2 カンタプロ試験

図-18に20°Cで実施したカンタプロ損失率の結果を示す。新規と再生混合物Aでは劣化14日後のカンタプロ損失量が高い傾向にあり、再生混合物Bでは低い傾向にあった。この傾向は、圧裂係数で見られたものと類似しており、締固め度の影響の可能性が考えられた。そのため、締固め度の影響が出にくいと考えられる60°C下で高温カンタプロ試験も実施した。ただし、圧裂試験や20°Cのカンタプロ試験の供試体と同じ再生骨材が入手困難となってしまうため、20°Cでのカンタプロ試験後の供試体を使用した。図-19に高温カンタプロ損失率を示す。一度20°Cでのカンタプロ試験によるダメージを受けているが、いずれの混合物でも劣化14日後の損失率は1%程度であった。また、混合温度を下げて、劣化14日後の損失率がほぼ同じであったことから、添加剤の種類に関わらず、新規混合物と同等の疲労破壊抵抗性を有する可能性が示唆された。ただし、今回は一度ダメージを受けた供試体を用いたため、得られた値はあくまでも参考値であり、今後締固め度の影響を排した供試体で再度確認を行う。

圧裂係数やカンタプロ損失率等の性状変化について、再生用添加剤の組成の影響か、締固め度の違いにより劣化進行の差の影響かは明確ではない。そのため、再生中温化アスファルト混合物の性状変化について、締固め度を適切に確保した上で、より詳細な検証が必要である。また、今回は酸化による劣化のみに着目しているが、今後は他の劣化因子による性状変化や、中温化による影響が反映されやすい性状について、さらに調査する予定である。

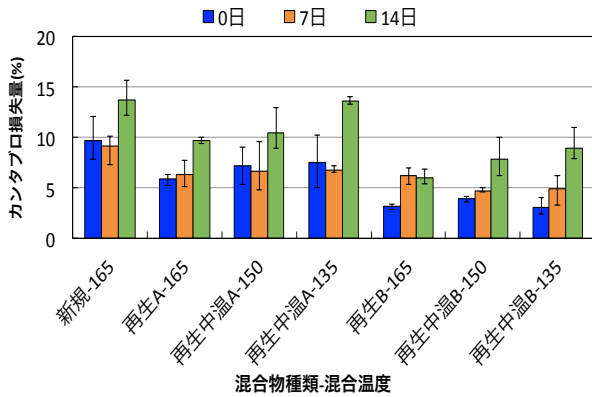


図-18 カンタブロ損失率(20°C)

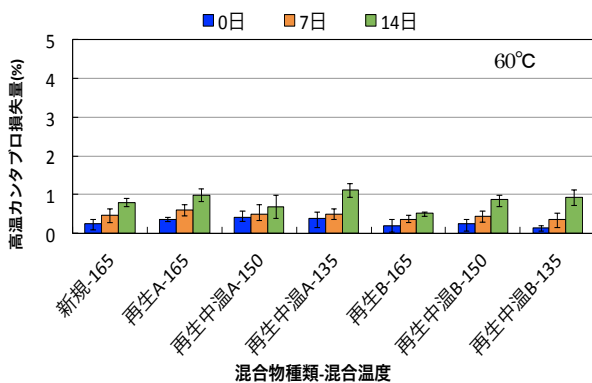


図-19 高温カンタブロ損失率(参考値)

9. まとめ

令和元年度までに得られた結果は次の通りである。

- 現状において、中温化再生アスファルト混合物の製造経験がある合材プラントは非常に少なく、さらに製造温度を20°C以上上げて製造した経験のあるプラントは、全体の2%程度しかなかった。
- アスファルト混合物の攪拌槽に蓋をしてアスファルトフュームの拡散を抑えることで、少ない量のアスファルト混合物からでもアスファルトフュームを採取することができるようになり、室内レベルでのアスファルトフュームの量的な検証が可能となった。
- 混合温度の低下に伴い、アスファルト混合物から採取したTPMやBSM量は減少した。
- 混合温度によってタール状の物質や油のようなものがフィルタに付着することが明らかとなり、それぞれの成分について質的な検証が必要である。
- 再生アスファルト混合物でも、混合温度低減によるBSM量の減少を確認した。なお、この効果に対して再生用添加剤の組成の影響は認められなかった。
- 従来、ベンゼンでアスファルトフュームの分析を

行っていたが、安全性を考慮して、トルエンやメチルエチルケトンなどによる代替が可能であることが明らかとなった。

- 再生用添加剤を含まない場合、再生アスファルト混合物から発生するアスファルトフューム量は、新規混合物と同程度だった。
- 室内の混合物作製時に、作業員が暴露する量はSDSの規定濃度の1/3以下であった。
- 国内で製造可能ないくつかの再生中温化アスファルト混合物の性状試験を実施した結果、混合温度を20°C程度下げても、圧裂係数や高温カンタブロ損失率などの性状への影響は小さく、新規アスファルト混合物と同等であると考えられた。
- 110°C下での養生による促進劣化を行った場合、再生中温化アスファルトの性状変化は、新規の混合物と同等である可能性が示唆された。しかし、供試体の作製方法が影響した可能性も残っているため、今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- 久保和幸、寺田剛、川上篤史、西崎到、新田弘之、辻本陽子、廣藤典弘、鈴木徹、源藤勉、小柴朋広、吉野敏弘、村井宏美、藤田浩成：低炭素舗装技術の高度化に関する研究—中温化技術の高性能化—、共同研究報告書、第470号、独立法人土木研究所 世紀東急工業株式会社、pp.4-80、2015.4
- 久保和幸、寺田剛、川上篤史、西崎到、新田弘之、辻本陽子、村山雅人、村井伸頼、梅森悟史：低炭素舗装技術の高度化に関する研究—アスファルト乳剤を用いたリサイクル技術の開発—、共同研究報告書、第469号、独立法人土木研究所 東亜道路工業株式会社、pp.2-16、2015.4
- Tepper A. L. et al : Acute Symptoms Associated with Asphalt Fume Exposure Among Road Pavers. Am. J. Ind. Med., 49, pp.728-729, 2006
- NCHRP: Field Performance of Warm Mix asphalt Technologies, 9-47A Final Report, 240p, 2014.
- NIOSH 5042 ; BENZENE-SOLUBLE FRACTION AND TOTAL PARTICULATE(ASPHALT FUME)、7p, 1998
- ASTM Designation:D6494-99 : Standard Test Method for Determination of Asphalt Fume Particulate Matter in Workplace Atmospheres as Benzene Soluble Fraction、pp.942-945、2010
- 田湯文将、新田弘之、川島陽子：再生加熱アスファルト混合物におけるアスファルトフュームの発生量に関する調査、第74回土木学会年次学術講演会公演概要集、V-100、2019
- 日本作業環境測定協会、作業環境測定ガイドブック、pp.99-104、2019

9 持続可能な建設リサイクルのための社会インフラ建設技術の開発

- 9) 川島陽子、田湯文将、新田弘之：アスファルトヒューム暴露量に対する安全性評価への取り組み、第33回日本道路会議、No.3148、2019
- 10) 田湯文将、新田弘之、川上篤史、川島陽子：アスファルト混合物の疲労破壊抵抗性に関する評価方法の検討、第33回日本道路会議、No.3055、2019
- 11) 並木大宜、加納陽輔、新田弘之、田湯文将：アスファルト舗装の劣化に関する基礎研究、第51回学術講演会、日本大学、pp.441-424、2018

9.2 リサイクル材等の環境安全性評価・向上技術の構築

9.2.2 建設発生土の適正利用に向けた環境安全性評価・対策手法の研究（発生源評価）

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質）

寒地基礎技術研究グループ（防災地質）

研究担当者：阿南修司、品川俊介、倉橋稔幸、山崎秀策

【要旨】

本報告では、ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりを対象に、蒸留水、脱気水および水素水溶液を試験溶媒として用いた繰返し溶出試験を実施し、酸化と還元によるヒ素・ホウ素の溶出傾向を把握した。また、溶出操作の異なる繰返し溶出試験を実施し、溶出操作の違いによるヒ素の溶出傾向を把握した。その結果、酸化還元電位が概ね400mVから100mVまでの還元的な環境に近づくヒ素、ホウ素の溶出量が増加することを確認した。さらに、より盛土内の実現象に近い溶出試験方法として、攪拌翼繰返し溶出試験、脱気水攪拌翼溶出試験を考案・実施した結果、振とうの結果生じる試料細粒化を抑制することで、従来の水平振とうによる溶出操作に比べて低いヒ素溶出量となる傾向を確認した。

岩石からの長期的な重金属等の溶出傾向を把握する試験である土研式雨水曝露試験結果を用いて、岩種と元素ごとに溶出パターンの特徴について分析を行ったところ、長期的に溶出濃度が増加する対応の必要性が高いパターンに該当する試料は、酸性化するものに多いことがわかった。また、土研式雨水曝露試験による長期溶出特性評価の妥当性を検証するため、実大盛土と土研式雨水曝露試験の浸出水濃度を比較し、土研式雨水曝露試験の濃度により、実現象を概ね適切に評価できることを確認した。

キーワード：ヒ素、ホウ素、酸化還元電位、繰返し溶出試験、長期溶出、溶出パターン

1. はじめに

土壤汚染対策法の改正（H22.4 施行）により、自然由来重金属等を含む土壤が規制の対象となり、法の対象外である岩石ずりについても自主的に対応する事例が急増している。また、自然由来重金属等を含む建設発生土は建設リサイクルの枠組みから外れており、高額な費用をかけて処分する必要があるため、時間的、費用的な面で事業執行上の大きな障害となっている。そのため、事業を円滑に推進するためには、自然由来重金属等を含む発生土の環境安全性の適切な評価に基づく有効利用の方策が求められる。

しかし、自然由来重金属等を含有する建設発生土の環境安全性評価においては、長期的な溶出特性を短時間で再現（評価）できる室内試験が確立されていないこと、実現場における酸化～還元的环境特性の違いによる溶出機構の評価方法が未確立であることから、元素の種別に応じた評価方法の開発や酸化還元特性に応じた溶出試験方法の改良が必要である。また対策工法では、吸着層工法における吸着層内の水みち形成等による重金属等の漏洩が課題であり、不溶化工法では土壤汚染対策法で示される措置の一

つとして、土質材料への信頼性が確保されている一方、岩石ずりへの信頼性については検討が必要である。

そこで本研究では、これらの課題を解決するため、元素の違いによる発生土のタイプや盛土と埋土の酸化還元環境の違いなどの利用形態に応じたリスク評価方法の提案、低コストな重金属汚染対策手法の提案を目標としている。

本報告では、令和元年度までの成果報告として、以下の分析を行った結果を報告する。まず、ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりを対象に、蒸留水、脱気水を試験溶媒として用いた繰返し溶出試験を実施し、酸化還元電位の変化に伴うヒ素・ホウ素の溶出傾向を分析した。そして、より還元的な環境を再現するため、水素ガスバブリングにより作製した水素水溶液を試験溶媒として用いた繰返し溶出試験を開発・実施し、ヒ素・ホウ素の溶出傾向を分析した。次にヒ素（As）を含む凝灰角礫岩ずり、軽石凝灰岩ずりおよび泥岩ずりを対象に、蒸留水を用いて、溶出操作の異なる繰返し溶出試験として、水平振とう試験と攪拌翼試験を実施し、溶出操作の違いによるヒ素の溶出傾向を分析した。また、攪拌翼試験法を基に盛土内環境を再現する形式に発展さ

せた、密閉容器を用いた低酸素条件下での脱気水攪拌翼試験法を開発し、元素溶出濃度の違いを分析した。

岩石からの長期的な重金属等の溶出の実態を把握するため、土研式雨水曝露試験結果を用いた元素ごとの溶出パターンの特徴を分析するとともに、土研式雨水曝露試験による長期溶出特性評価の妥当性を検証するため、実大盛土と土研式雨水曝露試験の浸出水濃度を比較し、土研式雨水曝露試験の濃度により、実現象を概ね適切に評価できることを確認した。

2. 研究方法

2.1 ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりの繰返し溶出試験

2.1.1 試料

試験に用いた試料は、北海道内のトンネル建設現場から採取した泥岩ずり 1 試料である。繰返し溶出試験の前処理として、試料を風乾後、ジョークラッシャーを用いて粉碎し、2 mm ふるいを通過したものをインクリメント法により分取後、繰返し溶出試験に供した。

2.1.2 繰返し溶出試験方法

繰返し溶出試験は、蒸留水、脱気水および水素水溶液に泥岩ずりを液固比 10 の割合で PVC ボトルに投入し、環境庁告示第 46 号の付表で示される方法を準用した試験を繰返し実施した。

脱気水は、窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で蒸留水に 1 時間窒素バブリングを行い作製した。蒸留水については大気条件下で、脱気水については窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で、それぞれの溶媒と泥岩ずりを PVC ボトル中で混合した。

水素水溶液を用いた繰返し溶出試験方法のフロー図を図-1 に示す。窒素ガスを充填した簡易グローブボックス

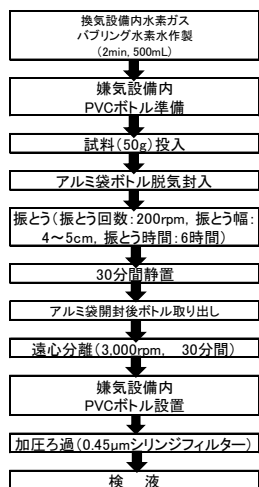


図-1 水素水溶液を用いた繰返し溶出試験方法のフロー図

表-1 分析項目および分析方法の一覧

分析項目	分析方法
ヒ素(As)	ICP質量分析法 (JIS K0102 61.4)
ホウ素(B)	ICP質量分析法 (JIS K0102 47.4)
鉄(Fe)	ICP発光分光分析法 (JIS K0102 57.4)
アルミニウム(Al)	ICP質量分析法 (JIS K0102 58.5)
pH	ガラス電極法 (JIS K0102 12.1)
シリカ(SiO ₂)	モリブデン青吸光度法 (JIS K0101 44.2)
カルシウム(Ca)	フレイム原子吸光法 (JIS K0102 50.2)
硫酸イオン(SO ₄)	イオンクロマトグラフ法 (JIS K0102 41.3)
酸化還元電位(Eh)	白金電極法 (1997版 河川水質試験方法(案) II-6)

内で、水素水溶液と泥岩ずりを PVC ボトル中で混合した。水素水溶液は、蒸留水に電動歯ブラシ型ウルトラファインバブル発生器を用いた水素ガスバブリングにより作製した。さらに、試験後の酸化還元電位の上昇を抑えるため、試料投入後の PVC ボトルをアルミ袋に入れ脱気封入した。

いずれの試験も振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm で 6 時間振とうし、それを 30 分間静置後に、再び 3,000 rpm、30 分間遠心分離した。蒸留水溶液は 0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過し、脱気水溶液および水素水溶液については窒素封入したグローブバック内でシリンジフィルター (孔径: 0.45 μm) により加圧ろ過し固液分離し、それぞれのろ液を検液とした。その後、試料残渣を用いてヒ素が環境基準値以下を示すまでの計 5 回、繰返し試験を実施した。

表-1 に示す分析項目および分析方法により各検液を測定した。pH を除く各溶出量の累積値を積算溶出量とし、酸化還元電位が異なる各溶液によるヒ素・ホウ素の溶出傾向を考察した。

2.2 溶出操作の異なる繰返し溶出試験

2.2.1 試料

試験に用いた試料は、北海道内のトンネル建設現場から採取した凝灰角礫岩ずり、軽石凝灰岩ずりおよび泥岩ずりの 3 試料である。試料を風乾後、ジョークラッシャーを用いて粉碎し、2 mm ふるいを通過したものをインクリメント法により分取後、繰返し溶出試験、粒度試験、岩石薄片の偏光顕微鏡観察、回折 X 線分析に供した。

2.2.2 粒度試験方法

溶出試験前後の試料を用いてレーザー回折・散乱法による粒度試験を行った。そして試験結果を用いて溶出操作の違いによる粒子破碎の影響について考察した。

2.2.3 繰返し溶出試験方法

溶出操作の異なる繰返し溶出試験は、環境庁告示第 46 号の付表で示される方法を準用した試験 (水平振とうに

よる繰返し溶出試験)と JIS K 0058-1 で示される方法を準用した試験(攪拌翼による繰返し溶出試験)をそれぞれ最大 8 回繰返し実施した。蒸留水を溶媒に液固比 10 の割合で各岩石ずりを PVC ボトルに投入した。水平振とうによる繰返し溶出試験では、PVC ボトルを振とう機に設置後、振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm で 6 時間振とうした。攪拌翼による繰返し溶出試験では、攪拌装置を PVC ボトルに取り付け、ボトル内の溶媒を毎分約 200 回転で 6 時間攪拌した。各試験の溶出操作後、PVC ボトルを 30 分間静置し、3,000 rpm、30 分間遠心分離した。固液分離は、蒸留水溶液が 0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過し、そのろ液を検液とした。その後、試料残渣を用いて繰返し試験を実施し、As が環境基準値以下を示す、または、一定の濃度を示すまでの最大 8 回行った。

検液中の As 濃度を ICP 質量分析法で測定した。試験回数までの As 溶出量の累積値を積算溶出量とし、溶出操作の違いによる As の溶出傾向を考察した。

2.2.4 脱気水を用いた攪拌翼試験方法

低酸素環境にある盛土内の静的な水・岩石反応を再現するために、脱気水を用いた攪拌翼試験を実施した。なお、脱気水を用いた溶出試験の準備・実施・測定はすべて、窒素供給により酸素濃度を 0.3 ppm 以下としたグローブボックス内において実施した。ボックス内および溶液の酸素濃度は蛍光式酸素濃度計を用いて測定を行った。

まず、脱気水の作成は、容量 2L のポリプロピレン製容器に蒸留水約 2L を満たし、テフロンチューブで供給された窒素ガス(純度 99.99%グレード)を用いて、グローブボックス内の酸素濃度が 0.3 ppm 以下に到達後 1 時間以上バブリングし、試験開始直前に酸素濃度が 0.3 mg/L 以下となることを確認し使用した。

試験後の酸素濃度の測定は、各試験の終了直後に上澄み液を 30 ml 程度採取し測定した。脱気水攪拌翼試験は、容量 500 ml のポリプロピレン製容器に試料 1.5 g、脱気水 150 ml、磁性攪拌子を取り付けた自作のポリプロピレン製攪拌翼と共に密閉し、蓋の上にマグネティックスターラーを下向きに設置することで攪拌翼を密閉容器内に設置した(図-2)。攪拌翼は、直径 24mm の 4 枚羽で構成され、接液部を液面から約 10mm とし、攪拌翼を 80-100rpm の速度で 6 時間回転動作させた。JIS K 0058-1 では攪拌速度を 200rpm と定めているが、水流により微粒子の巻き上げを低減し、より静的な岩石・水反応に近づけるためである。試験後速やかに上澄み液を採取し、蛍光式酸素濃度計を用いて酸素濃度を測定し、その後、上澄み液を 50ml

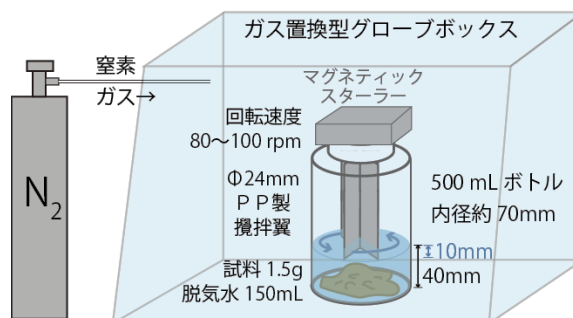


図-2 脱気水を用いた密封攪拌翼試験の概要

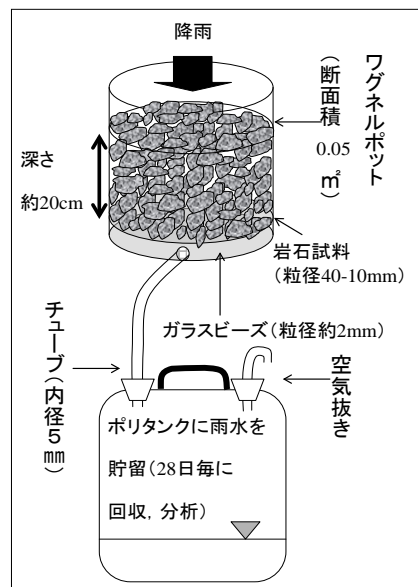


図-3 土研式雨水曝露試験の概要¹⁾

遠沈管に採水し、4500rpm、10 分間の遠心分離を行い、その上澄み液を径 0.45 μm のメンブランフィルターで濾過し、pH、EC、ORP の測定および ICP 質量分析法で各種元素濃度の測定を行った。

また同時に、蒸留水と脱気水を用いた環境庁告示第 46 号による水平振とう試験と、蒸留水を用いた大気封入条件での密封攪拌翼試験を実施し、比較した。

2.3 土研式雨水曝露試験の元素別溶出パターン分析

岩石からの重金属等の溶出現象の実態を把握するための土研式雨水曝露試験結果と重金属等の溶出特性を把握する指標の一種である短期溶出試験、酸性化可能性試験などを比較し、元素ごとの溶出パターンについて分析を行った。

土研式雨水曝露試験(図-3)は、ハンマーで粉碎して粒径を約 40~10mm に調整した岩石試料をワグネルポットに投入し、これを屋外に曝露し、試料中を通過した雨水をポリタンクに捕集して、28 日おきに水質分析を行うものである。本試験は、酸化的で乾湿繰返しが起こる状況下での長期的な重金属等の溶出性やその時間変化、および酸

性化の状況を把握するものである。

短期溶出試験は、分取した岩石試料を粉碎し、2mm 目のふるいを全通させた試料を用い、土壌溶出量試験（環境省告示第 18 号、平成 15 年）に準拠して溶出操作を行うものであり、主に重金属等の水へ溶出しやすさを把握するための試験である。

酸性化可能性試験（JGS0271-2016）は、短期溶出試験と同様の試料を用い、30%過酸化水素水溶液と岩石粉碎試料を混合し、反応終了後の pH を測定するもので、主に硫化鉱物の酸化による酸性化のポテンシャルを把握するための試験である。

今回検討に用いた試料は、道路建設のための調査ボーリングによって得られた岩石試料 40 検体（表-2）である。

また、本論で検討を行う項目は、カドミウム、鉛、ヒ素、セレン、フッ素、ホウ素および pH とした。

表-2 分析対象試料一覧

試料名	地質年代	岩種	試料名	地質年代	岩種
KZ	新第三紀	泥岩	NA6	新第三紀	シルト岩(熱水変質)
SR	新第三紀	泥岩	NA7	新第三紀	砂岩(熱水変質)
DG1	新第三紀	泥岩、変質安山岩	NA8	新第三紀	砂岩泥岩互層(熱水変質)
DG2	新第三紀	泥岩	NG3	古第三紀	花崗岩
KB6	古第三紀	泥岩	NG6	古第三紀	花崗岩(風化)
TE	ペルム紀	頁岩	NG9	古第三紀	花崗岩(風化)
AT1	新第三紀	泥岩	NG12	古第三紀	玄武岩(変質)
AT2	新第三紀	泥岩(珪化変質)	NG15	古第三紀	花崗岩(風化)
AT3	新第三紀	泥岩(珪化変質)	TH1	第四紀	砂岩泥岩互層
AT4	新第三紀	泥岩(珪化変質)	TH2	第四紀	凝灰質礫岩
AT5	新第三紀	泥岩(珪化変質)	TH3	第四紀	砂質凝灰岩
AT6	新第三紀	泥岩(珪化変質)	TH4	第四紀	凝灰質砂岩
AT7	新第三紀	ドレライト(脈状変質)	TH5	第四紀	泥岩
AT8	新第三紀	泥岩(脈状変質)	TH6	第四紀	火山礫凝灰岩泥岩互層
AT9	新第三紀	泥岩(珪化変質)	TH7	第四紀	凝灰質礫岩・砂岩
NA1	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	TH8	第四紀	凝灰質砂岩
NA2	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	TH9	第四紀	凝灰質礫岩
NA3	新第三紀	砂岩(熱水変質)	UT1	新第三紀	砂質泥岩
NA4	新第三紀	砂岩(熱水変質)	UT2	新第三紀	砂質泥岩
NA5	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	UT3	新第三紀	凝灰質砂岩

2. 4 土研式雨水曝露試験の長期溶出特性評価の妥当性の検証

発生土を盛土に利用する場合を想定した、最も実際の利用環境に近い長期溶出試験方法は実大盛土試験であるが、試料の入手性、経済性などの理由から実施可能な場合はほとんどなく、多くの場合、土研式雨水曝露試験などの方法によっている。今回事業者の協力を得て実大盛土実験を行う機会を得たことから、土研式雨水曝露試験の長期溶出特性評価の妥当性を検証する目的で、両試験の比較を実施した。

試料は新第三系の泥岩で、切土のり面を奥行き最大 7m 程度追い込み掘削し、採取した。なお表層 30cm 程度の部分は風化の影響が強いと判断し、試験試料から除いた。実験に用いた岩石試料の短期溶出試験および酸性化可能性試験の結果を表-3 に示す。

実大盛土試験は、掘削した岩石を粒径約 10cm 以下に破碎し、底面約 13m 四方、天端約 4m 四方、高さ約 3m の

表-3 試料の短期溶出試験および酸性化可能性試験結果

項目	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)	As (mg/L)	Hg (mg/L)	Se (mg/L)	F (mg/L)	B (mg/L)	pH	EC (mS/m)	pH (H ₂ O ₂)
分析値	0.017	0.005	<0.02	0.001	<0.0005	0.04	0.2	0.05	3.3	78.1	1.9

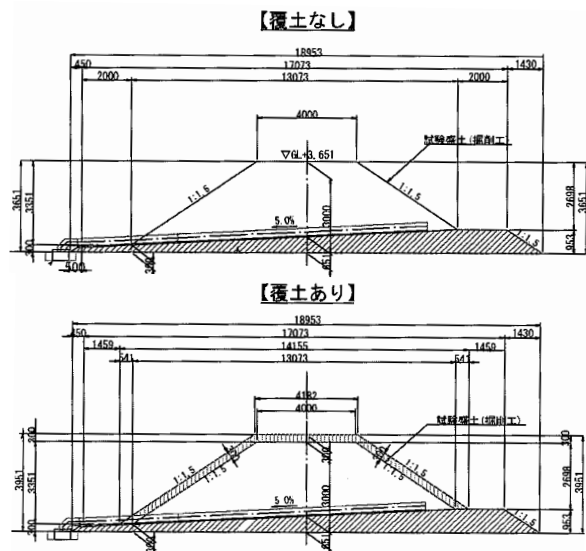


図-4 実大盛土の断面図

盛土を築造（図-4）した。その際、盛土底面には遮水シートを敷き、シート上面には勾配を設け中央排水管より集水し、タンクに貯留する構造とした。そして浸透した雨水を回収し、概ね 14 日ごとに分析を行った。盛土は覆土なしと厚さ 30cm の覆土ありの 2 種類を築造し、内部には酸素濃度計を埋設した。

土研式雨水曝露試験は、前項に示したとおりである。

3. 研究結果

3. 1 繰返し溶出試験結果

酸化還元電位と pH および As、B、Fe、Al、SiO₂、SO₄、Ca の積算溶出量との関係を図-5 に示す。繰返し溶出試験の酸化還元電位は、蒸留水、脱気水、水素水溶液の順に低下した。溶出 1 回目と溶出 5 回目の pH を比較すると、溶出 1 回目の pH は蒸留水、脱気水および水素水溶液で 10.1~10.3 を示したが、溶出 5 回目の pH は蒸留水が 9.0~9.2、脱気水が 9.6~9.7、水素水溶液が 9.8 に低下した。酸化還元電位が低くなるほど、pH の低下が抑制される傾向を示した。また、As は酸化還元電位の低下に伴い積算溶出量が増加した。一方、B は酸化還元電位の低下に伴い 1 回目における積算溶出量に増加が認められ、脱気水の 5 回目の積算溶出量が最大値を示した。酸化還元電位の低い脱気水と水素水溶液の Al、Fe および SiO₂ は、蒸留水と比較して高い積算溶出量を示した。特に、脱気水のものが最大値を示した。そのほか、

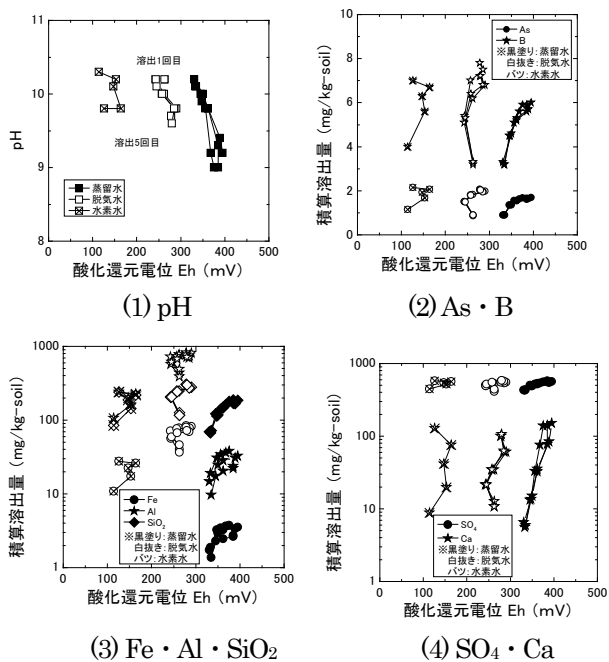


図-5 酸化還元電位と pH および各分析項目の積算溶出量との関係

SO₄では積算溶出量にほとんど差は見られなかったが、Caでは脱気水、水素水溶液のものと比較して蒸留水のものが高値を示した。これらは、蒸留水と比較して酸化還元電位の低い脱気水・水素水溶液が、泥岩中の粘土鉱物、菱鉄鉱、黄鉄鉱の溶解を促進したことや、FeやAlの酸化反応による水酸化鉄や水酸化アルミニウムの生成にともなう共沈が少なかったことなどによると考える。また、脱気水・水素水溶液と比較して蒸留水のCaが高い積算溶出量を示したのは、pHが低下したために方解石の溶解が促進されたことによると考える。

次に、溶媒の違いに着目すると、溶出1回目の試験後酸化還元電位が、水素水溶液で114 mVと最も低い値を示し、AsとBの溶出1回目の積算溶出量が1.15 mg/kg-soilと4.0 mg/kg-soilとそれぞれ最大値を示した。これらの結果から、水素ガスバブリングにより作製した水素水溶液を溶媒として還元条件下において溶出試験を行う方法が、溶媒の水質を変えずに還元環境を再現する溶出試験方法として有効であると考えられる。一方、試験法として活用するためには、水素添加により試験水の初期の水素濃度(酸化還元電位)をどのようにコントロールし、水素の溶存形態や、経時変化する溶存水素濃度を精度良く制御・測定するのかが課題が残る。

3.2 溶出操作の異なる繰返し溶出試験結果と粒度試験結果

3.2.1 繰返し溶出試験結果

溶出試験に用いた3試料の岩石薄片観察、回折X線分析結果から、元素溶出に関する構成鉱物を明らかとした。軽石凝灰岩ずりは、石英、明礬石(硫酸塩鉱物)、ディッカイト、黄鉄鉱から構成される珪化・酸性変質した火山岩であり、最大でmmサイズとなる自形の黄鉄鉱を大量(数%)含む。凝灰角礫岩ずりは、石英、斜長石、カリ長石、蛭石、カオリナイト、絹雲母からなる酸性変質火山岩であり、炭酸塩鉱物(ドロマイト、マグネサイト)の鉱物片を多く含み、径0.1mm以下の微小な自形~半自形の黄鉄鉱を微量含む。泥岩ずりは、石英、斜長石、ドロマイト、スメクタイト、菱鉄鉱、黄鉄鉱から構成される砂質泥岩で、黄鉄鉱は極微量含まれ、フランボイダル状の微小結晶の集まりとして観察される。

溶出回数とAs溶出量との関係を図-6に示す。溶出1回目のAs溶出量は、いずれの試料においても攪拌翼の方が低い値を示した。また、溶出回数が2回目以降は、溶出操作を問わずすべての試料でAs溶出量が低下した。特に、泥岩ずりは他の2試料と比較して、少ない溶出回数でAs溶出量の低下も顕著であった。

溶出回数とAs溶出量との関係を図-6に、積算溶出量との関係を図-7に示す。As積算溶出量は、すべての試料において水平振とうによる試験結果が高値を示した。水平振とうおよび攪拌翼による繰返し溶出試験前後の試料の平均粒径を図-8に示す。試験後の平均粒径は、すべての試料において水平振とうによる繰返し溶出試験の平均粒径が低い値を示し、細粒分が増加していることを確認した。これは、攪拌翼による溶出操作よりも水平振とうによる溶出操作の方が試料の粒子破碎の影響が大きいことを示している。図-7よりAs積算溶出量の高い水平振とうによる繰返し溶出試験結果は、試料の粒子破碎が進み試験を行う度に試料の新鮮部が現れることから、Asの溶出量が増大していったものと考えられる。一方、攪拌翼による溶出操作は、粒子破碎の影響が小さいことから、より実現に近い試験であると考えられる。このことから、攪拌翼を用いた繰返し溶出試験は、溶出傾向が把握でき、かつ比較的短時間で実施可能な実現現象再現溶出試験方法として位置づけることができるものと考えられる。

3.2.2 脱気水を用いた攪拌翼溶出試験結果

上述のJIS K 0058-1方式での攪拌翼繰返し溶出試験は試料の細粒化を抑制し、実現に近い形での溶出傾向を示す可能性を示したが、試験液の酸素濃度は大気平衡であるため、盛土内の低酸素環境での溶出を再現できていない。そこで、令和元年度には、攪拌翼試験をより盛土内環境に

9 持続可能な建設リサイクルのための社会インフラ建設技術の開発

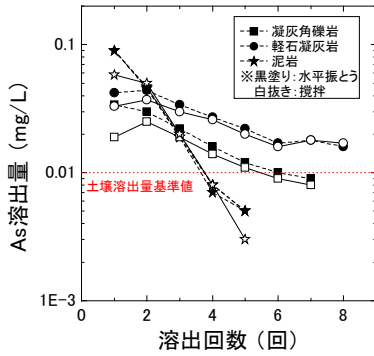


図-6 溶出回数と As 溶出量との関係

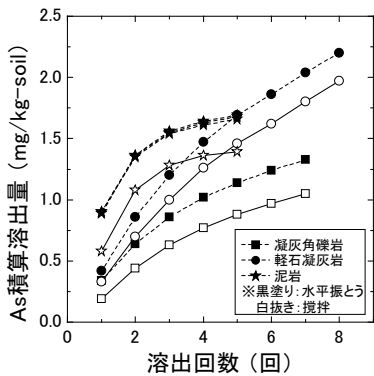


図-7 溶出回数と As 積算溶出量との関係

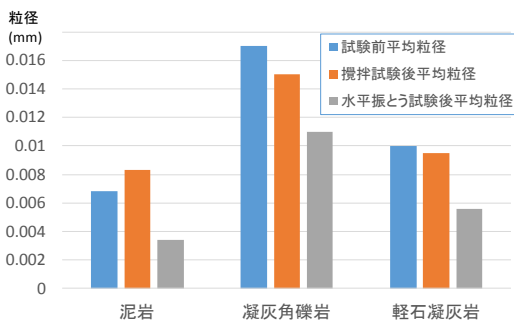


図-8 水平振とうおよび攪拌翼による繰り返し溶出試験前後の試料の平均粒径

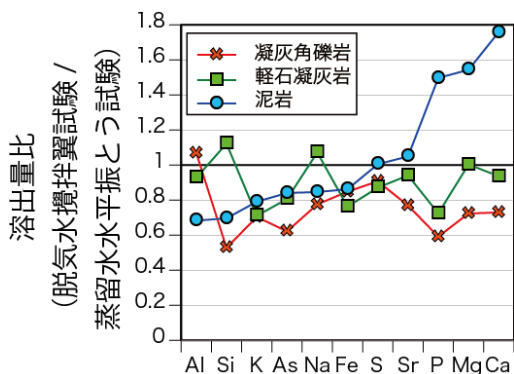


図-9 蒸留水水平振とう試験に対する脱気水攪拌翼試験の元素溶出比

近づけるために、密閉容器に脱気水を封入し実施する攪拌翼試験法を開発し、溶出試験を実施した(図-2)。

試験結果として、3 試料に共通して、脱気水を用いた攪拌翼試験は、大気平衡の水平振とう試験に比べて試験液の pH が高い結果となった。これは、試験に用いた蒸留水が pH 7.12 の中性である一方、試験に用いた脱気水は pH 9.61 のアルカリ性となった影響と考えられる。またいずれの試料でも、攪拌翼試験で電気伝導度が小さくなる傾向が認められ、水平振とう試験に比べて元素の総溶出量が小さいことが推測された。これは、過年度の試験結果同様に、攪拌翼試験では水平振とう試験よりも、機械的な粒子の破壊が抑制され、より静的な試料表面での溶出・吸着・錯体形成などの反応が進行したためと解釈される。また、酸化還元電位は凝灰角礫岩では、蒸留水水平振とう試験で 105 mV であったものが、脱気水攪拌翼試験では 143 mV と酸化的となり、軽石凝灰岩・泥岩試料では、蒸留水水平振とう試験がそれぞれ 29 mV、35 mV に対し、脱気水攪拌翼試験では -73 mV、-55 mV と還元的な結果となった。また、脱気水を用いた試験ではいずれも結果も溶出液の溶存酸素濃度が、ブランク溶液よりもわずかに高い結果を示した。これは、溶出液の液性を支配する水・鉱物反応が岩種毎に異なる可能性を示唆しており、脱気水を用いた密閉攪拌翼試験が、実盛土内の還元かつ低酸素環境をより近似し、試料特性に応じた岩石水反応を反映する溶出試験法であることを示している。

次に、脱気水攪拌翼試験における元素溶出傾向を把握するために、図-9 に脱気水攪拌翼試験と水平振とう試験の溶出濃度比を試料毎にプロットした図を示す。元素毎に溶出量比を見ると、例えば泥岩試料では Ca、Mg、Sr が多いことから、炭酸塩鉱物からの溶出量が水平振とう試験よりも増えていることが読み取れる。このように、水平振とう試験と攪拌翼試験では単純に総溶出量が小さくなるだけではなく、元素によっては溶出量が増加する結果を示した。特に、蒸留水水平振とう試験に対する脱気水攪拌翼試験のヒ素(As)の溶出濃度は、凝灰角礫岩 0.045 mg/L に対して 0.028 mg/L (62%に低減)、軽石凝灰岩では 0.047 mg/L と 0.038 mg/L (81%)、泥岩で 0.10 mg/L と 0.085 mg/L (84%) と、過年度実施の攪拌翼繰り返し溶出試験と同様に、低い濃度を示す結果となった(表-4、図-9)。3 試料共に低濃度を示す一方、試料間で低減率が異なる理由の解釈として、ヒ素の溶出濃度は、単純な水平振とうによる機械的な表面摩耗・細粒化の影響が低減されたことに加えて、鉱物表面での溶出・吸着機構が、試料特性(例えば黄鉄鉱や硫

表-4 脱気水・蒸留水を用いた攪拌翼・水平振とう溶出試験の pH、電気伝導度(EC)、酸化還元電位(ORP)、溶存酸素濃度(DO)の測定結果一覧
試験実施温度は 27±1℃の恒温条件で実施した。

試料	試験法	試験液	pH	EC mS/m	ORP mV	DO mg/L	As mg/L
凝灰角礫岩	攪拌翼	蒸留水	5.94	7.78	72	8.27	0.028
		脱気水	6.22	8.85	143	0.16	0.028
	水平振とう	蒸留水	5.94	10.35	105	8.21	0.045
		脱気水	6.04	12.32	142	0.41	0.044
軽石凝灰岩	攪拌翼	蒸留水	8.51	15.58	31	7.28	0.039
		脱気水	9.72	17.40	-73	0.41	0.038
	水平振とう	蒸留水	9.21	14.29	29	7.23	0.047
		脱気水	9.91	15.10	-23	0.23	0.042
泥岩	攪拌翼	蒸留水	9.98	32.00	46	7.38	0.104
		脱気水	10.04	30.00	-55	0.44	0.085
	水平振とう	蒸留水	10.02	31.60	35	7.26	0.101
		脱気水	10.04	34.10	58	1.10	0.106
ブランク溶液	蒸留水	7.12	0.24	218	8.10	<0.012	
	脱気水	9.61	0.22	206	0.07		

酸塩鉱物の形態)に応じてより実現に近い静的な条件で反応したためと解釈される。一方で、ヒ素の溶出濃度に対する酸素濃度の影響は 3 試料共にほとんど認められなかった。今後は、溶出傾向に対する攪拌速度(流速)、試験時間、初期溶存酸素量の影響等を評価し、実盛土や中～長期のカラム試験結果との整合性を示す試験条件を模索すると共に、溶出源鉱物や酸化傾向の異なる多様な地質試料を対象とした実験データの蓄積が必要であろう。

3.3 盛土の環境特性を考慮した発生源評価方法の位置づけと課題

現場内の環境特性(酸化と還元)による溶出機構の評価方法が未確立であったことから、平成 28 年度から令和元年度までに、酸化と還元に着目した各種の溶出試験方法を実施してきた。溶出条件を個別に設定した試験方法は、実際の現場条件に見合った設計、管理、評価にとって重要であるため、個々の試験に残された課題への取り組みと併せて、各試験の意義や位置づけを明確化する必要がある。そこで、これまで実施してきた試験方法について、図-10 に示すように盛土内環境を想定した各種実現現象再現溶出試験の位置づけを行った。盛土内の酸化と還元の環境を縦軸に、試験の所要時間と室内から実

規模までの試験の扱いやすさを共に横軸にとり、各試験を位置づけた。室内と実規模では試験期間が異なることから、短い検討期間で発生源評価を行う場面では、従来の方法より試料の細片化による影響が少ない攪拌翼による溶出試験、盛土内の還元的環境を再現する脱気水や水素水溶液を用いた溶出試験を実施することが有効であると考えられる。一方、現場の規模が大きく比較的発生源評価の検討期間が長くとれる場面では、実際の環境で長期溶出傾向を把握可能な土研式雨水曝露試験、大型カラム試験、実大盛土試験を実施することが望ましいと言える。攪拌翼による繰返し溶出試験や不飽和カラム試験は、現状では試験の実施例が少ないため、タンククリーニング試験などの実績のある試験方法と比較検証により、引き続き実証データの蓄積が必要である。

3.4 土研式雨水曝露試験の元素別溶出パターン分析

各試料の短期溶出試験、酸性化可能性試験結果、土研式雨水曝露試験における pH および浸出水濃度の変化パターンを表-5 に整理した。また、元素ごとにどの変化パターンが該当したかについて、表-6 に整理した。また図-11 に濃度変化パターンの判断例を示す。

以下に、元素別の曝露試験結果の特徴を整理する。

1) カドミウム (Cd)

カドミウムは、浸出水 pH が 3 未満の強酸性条件下で溶出することがほとんどである。また、pH 低下に伴って溶出濃度が増大しているように見えるもの(パターン C に分類される)が多く、溶出は止まりにくい傾向にある。今回分析した試料においては変質岩からの溶出が多かった。

2) 鉛 (Pb)

鉛は、浸出水が酸性のものだけでなく、中性域のものからも溶出している。初期に溶出濃度のピークが現れる試料のほとんどはすぐに溶出濃度が低下し、実現象として問題になるものではないと評価できるものであった。

ある時点から濃度が上昇するパターン (C) が多く、変質岩からの溶出が多かった。また、鉛の溶出が継続するパターン B や E はなかった。

3) ヒ素 (As)

多様な岩石から溶出が認められる。また、濃度変化パターンも A (初期に濃度ピークがあり、その後急速に減ずる)、C (ある時点から濃度が上昇)、E (濃度変化が小さい) がほぼ同数認められた。これまでの実験結果から、非変質の泥岩からの溶出は初期に濃度ピークが認められてその後減衰する、パターン A が多いと

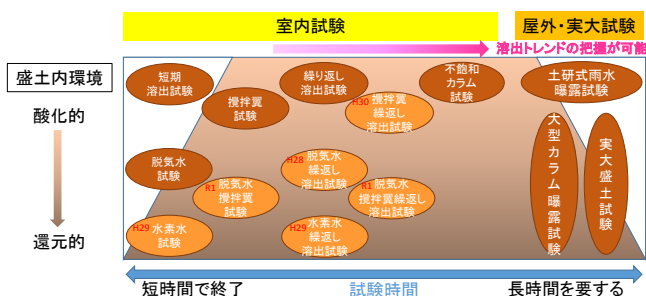
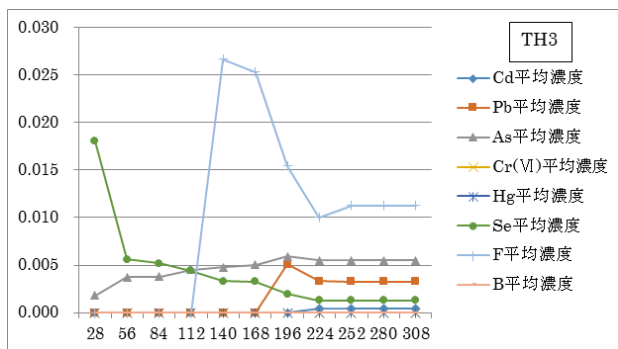
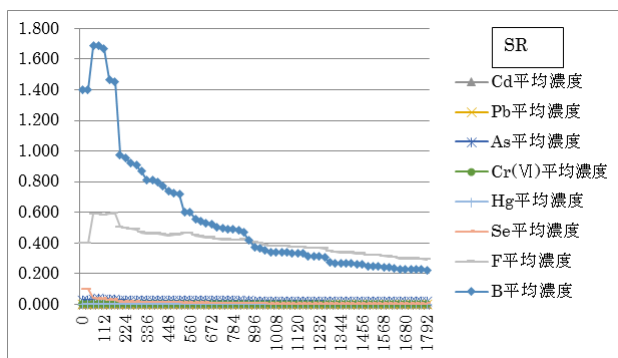


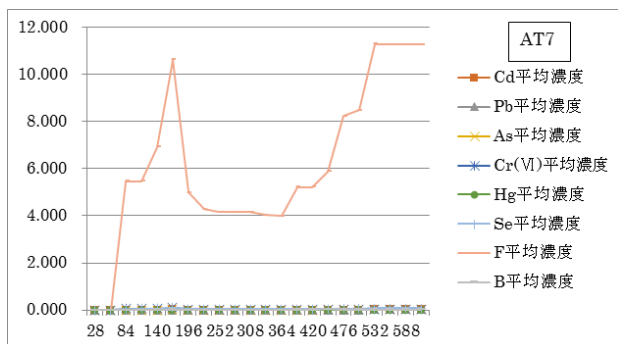
図-10 盛土内環境を想定した各種実現現象再現溶出試験の位置づけ



例1) パターン：セレン(A)、鉛・フッ素(C)、ヒ素(E)



例2) パターン：ホウ素(A)、フッ素(B)



例3) パターン：フッ素(D)

図-11 曝露試験の平均濃度変化パターンの判断例、各グラフの横軸は日数を、縦軸は濃度 (mg/L) を示す。

高濃度になることがしばしば認められる。これらは、現場において対応が必要なものが多いものと考えられる。なお、これらは、おおむね酸性化可能性試験で事前に把握することが可能である。また、個のパターンは、ホウ素では認められなかった。

- 4) 濃度が不規則に変化するパターンDは、数は少ないが、解釈が困難である。ただし、今回の分析においてAT7という試料で6元素が本パターンと認識された。本試料が特異な性状である可能性がある。これについては夏場にpHが低くなっており、これに連動して溶出濃度が増加しているように見えることから、曝露試験を継続実施して、その原因を把握する必要がある。

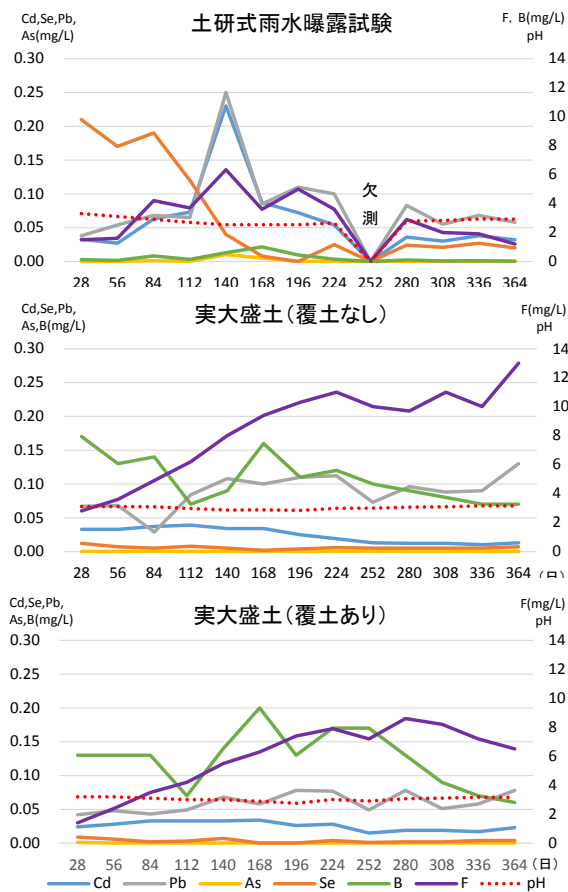


図-12 364日間の浸出水分析結果

上：土研式雨水曝露試験、中：実大盛土試験（覆土なし）、下：実大盛土試験（覆土あり）

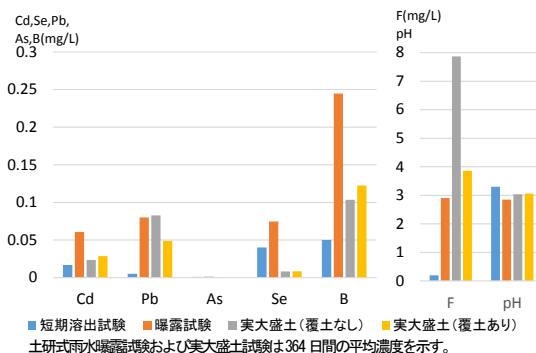


図-13 各種試験結果の比較

ると考えられる。

- 5) 溶出濃度があまり変動しないパターンEについて、非酸性のものは濃度が低いものが多い。ただし、非酸性のヒ素で溶出が続くものが認められる。非酸性のヒ素についてはパターンAも存在しており、それらとは溶出機構が異なると考えられる。今後、長期溶出特性に基づく発生土の分別を考える上で、これらの溶出機構の違いを検討することが有用であると考えられる。

3. 5 土研式雨水曝露試験の長期溶出特性評価の妥当性の検証

1) 実験結果

土研式雨水曝露試験および実大盛土試験の28日ごとの364日間(以下、「1年間」という)の浸出水分析結果について、図-12に示す。また短期溶出試験および土研式雨水曝露試験、実大盛土試験の各分析項目の1年間平均値を図-13に示す。

酸性化については、いずれの試験でもpH3前後の値を示しており、大きな違いが見られない。

カドミウムについては、土研式雨水曝露試験で140日目に極大を示し、その後急激に濃度を減じた。一方、実大盛土試験においても112日目(覆土なし)ないしは168日目(覆土あり)に濃度ピークが得られているが濃度ピークは低く、また濃度の変化は緩やかであった。

鉛については、短期溶出試験で定量下限値以下であったにもかかわらず現地試験で比較的高濃度の溶出が見られた。土研式雨水曝露試験でカドミウムとほぼ同じような変化が見られ、実大盛土試験との濃度の差はあまり大きくなかった。また溶出初期と1年後の濃度を比較するとあまり違いがなかった。

ヒ素については、いずれの試験でも溶出濃度が小さかった。

セレンについては、土研式雨水曝露試験において初期に濃度ピークが見られ100日を過ぎたあたりから濃度の急激な減少が見られた。一方、実大盛土試験では初期を除いて0.01mg/Lを下回る低濃度で推移した。

ふっ素については、短期溶出試験では低濃度であったものの、現地試験において高濃度の溶出が見られた。土研式雨水曝露試験ではカドミウムと同じような変化が見られた。実大盛土試験(覆土なし)では200日頃まで濃度が単調増加し、1年後においても上昇傾向が認められた。一方、覆土ありの場合では280日に濃度ピークが見られ、その後濃度の減少が見られた。また、覆土ありの場合が、覆土なしの場合より濃度が低い傾向が顕著であった。

ほう素については、土研式雨水曝露試験のみで高濃度の溶出が認められたが、168日に濃度ピークが見られた後、濃度は急激に減少した。

2) 土研式雨水曝露試験と実大盛土試験の比較

土研式雨水曝露試験と実大盛土試験の結果を1年間の平均濃度で比較を行うと、実大盛土試験(覆土なし)のふっ素以外は土研式雨水曝露試験と実大盛土試験の濃度はほぼ同じか、土研式雨水曝露試験の方が高濃度であった。すなわち、土研式雨水曝露試験結果に基づく評価は概ね安全

側の評価を与えることがわかった。

土研式雨水曝露試験より実大盛土試験の方が浸透水量に対する固相の量が多いこと、すなわち液固比が小さいことから、溶出濃度について土研式雨水曝露試験の方が実大盛土試験より低くなることが予想される。しかしながら実際には予想と異なる結果が得られた。土研式雨水曝露試験に比べ、実大盛土の内部は酸素の供給が限定的であると考えられるが、覆土ありと覆土なしの溶出濃度の比較では覆土なしの方が概ね低濃度となっており、部分的に観測できた盛土内の酸素濃度観測結果でも覆土ありの場合が覆土なしの場合より酸素濃度が低い傾向が見られた。以上を踏まえると、酸素の供給条件が溶出濃度の違いに影響した可能性があると考えられる。

4. まとめ

平成28年度から令和元年度までに実施した研究結果を以下にまとめる。

- 1) ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりを対象に、蒸留水、脱気水を試験溶媒として用いた繰返し溶出試験を実施した結果、本試験に用いた泥岩ずりは酸化還元電位が低下すると、ヒ素、ホウ素ともに積算溶出量が増加した。これは、還元的な環境に近づくヒ素、ホウ素の溶出量が増加することを示唆された。さらにより還元的な水素水溶液を溶媒に繰返し溶出試験を実施した結果、酸化還元電位が概ね400mVから100mVまで低下し、かつ、As・Bの初期積算溶出量も最大値を示したことから、水素バブリングによる水素水溶液を用いたバッチ溶出試験が還元環境を再現するバッチ溶出試験方法として有効である。
- 2) ヒ素を含む凝灰角礫岩ずり、軽石凝灰岩ずりおよび泥岩ずりを対象に、溶出操作の異なる繰返し溶出試験を行った結果、溶出操作の違いによるAs積算溶出量は、攪拌翼よりも水平振とうによる溶出操作が高い値を示し、試験前後試料の粒度試験結果から試料の粒子破碎が大きく影響したものと考えられた。
- 3) 脱気水を用いた攪拌翼溶出試験法を開発し実施した結果、水平振とう試験に対してヒ素の溶出濃度が62～84%減を示し、他の溶出元素では、試料毎に増加・減少の傾向が異なる結果を示した。これは、本方式による脱気水攪拌翼溶出試験法が、試料の摩耗・細粒化効果を低減させ、より盛土内の実現象に近い水・岩石反応を模した溶出試験法として評価されると考えられる。
- 4) 土研式雨水曝露試験の元素別溶出パターン分析を行い、

長期的に溶出濃度が増加する対応の必要性が高いパターンに該当する試料は、酸性化するものに多いことがわかった。これらは短期溶出試験では把握できないが、酸性化可能性試験で把握が可能である。

- 5) 土研式雨水曝露試験と実大盛土試験の結果を1年間の平均濃度で比較したところ、概ね、土研式雨水曝露試験の方が高濃度か同じ程度であることから、土研式雨水曝露試験による濃度により、実現象を概ね適切に評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所、応用地質(株)、大成建設(株)、三信建設工業(株)、住鋁コンサルタント(株)、日本工営(株)：建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル(暫定版)、共同研究報告書第358号、p.89、2007
- 2) 島田允堯：自然由来重金属と環境汚染—応用地質学・地球化学的データバンクー、愛智出版、240p、2014

9.2 リサイクル材等の環境安全性評価・向上技術の構築

9.2.3 建設発生土の適正利用に向けた環境安全性評価・対策手法の研究（発生土利用技術）

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質）

寒地基礎技術研究グループ（防災地質）

研究担当者：阿南修司、品川俊介、倉橋稔幸、山崎秀策

【要旨】

本報告では、ヒ素・ホウ素を含む蒸留水、脱気水および水素水溶液を試験溶媒として、盛土（酸化）と埋土（還元）を想定したバッチ吸着試験を開発・実施し、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。これらの結果、酸化還元電位が概ね 400 mV から 250 mV まで低下すると、天然材料へのヒ素の吸着性能が低下し、ホウ素の吸着性能が向上することを確認した。また、ヒ素を含有する酸性水を試験溶媒として、天然・人工資材を用いた中和・吸着試験を実施した結果、炭酸カルシウム系中和資材と鉄系吸着資材を併用した場合に、ヒ素・セレン・鉛の吸着効果が確認された。また一方で、水酸化鉄の沈殿物の生成が促進されるケースを確認した。

吸着層工法に関する設計上の課題である、盛土内での水の流れに関して文献調査を実施したところ、課題解決の可能性のある工法が見いだされた。また一般的に適用されている吸着層工法に関して、盛土中の水の流れに着目したシミュレーションモデルを作成した。

キーワード：ヒ素、ホウ素、酸化還元電位、連続溶出試験、吸着試験、吸着層工法

1. はじめに

土壤汚染対策法の改正（H22.4 施行）により、自然由来重金属等を含む土壌が規制の対象になり、法対象外である岩石ずりも自主的に対応する事例が増している。また、自然由来重金属等を含む建設発生土は建設リサイクルの枠組みの外にあり、高額な費用をかけて処分するなど、時間的、費用的な面で事業執行上の大きな障害となっている。事業を円滑に推進するためには、自然由来重金属等を含む発生土の環境安全性の適切な評価に基づく有効利用方策が求められている。

しかし、自然由来重金属等含有岩石の環境安全性評価においては、長期的な溶出特性を短時間で再現（評価）できる室内試験が確立されていないこと、現場内の酸化と還元的环境特性による溶出機構の評価方法が未確立であることから、元素の種別に応じた評価方法の開発や酸化還元的环境特性に応じた溶出試験方法の改良が必要である。また、対策工法では吸着層工法における吸着層内の水みち形成等による重金属等の漏洩が課題である。一方、不溶化工法においては、土壤汚染対策法で示される措置の一つとして土質材料への信頼性が確保されているが、岩石ずりへの信頼性については検討が必要である。

そこで、これらの課題を解決するため、本研究では元素

の違いによる発生土のタイプや盛土と埋土の酸化還元環境の違いによる利用形態に応じたリスク評価方法の提案、低コストな重金属汚染対策手法の提案を目標としている。

本報告では、ヒ素・ホウ素を含む蒸留水、脱気水を用いたバッチ吸着試験を実施し、酸化還元電位に応じた天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。また、より還元的な環境を再現するため、水素ガスバブリングにより作製した水素水溶液を試験溶媒として用いたバッチ吸着試験方法を開発・実施し、酸化還元電位に応じた天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。

さらに、重金属の溶出に酸性化を伴う発生土に人工・天然資材を用いた中和工法と重金属溶出の不溶化工法を併用した際の影響を調査する目的で、ヒ素を含む酸性水を用いて天然の炭酸カルシウム系中和剤と、人工の鉄系吸着剤を用いた吸着試験を実施した。

また、吸着層工法の設計上の課題の一つである、盛土内の水の流れに関して、文献調査を実施するとともに、一般的な吸着層工法の構造における盛土中の水の流れに着目したシミュレーションの検討を行った。

2. 研究方法

2.1 盛土と埋土を想定したバッチ吸着試験

2.1.1 試料

溶媒作製に用いた試料は、北海道内のトンネル建設現場から採取した泥岩ずり 1 試料である。連続溶出試験の前処理として、試料を風乾後、ジョークラッシャーを用いて粉砕し、2mm ふるいを通過したものをインクリメント法により分取後、連続溶出試験に供した。検液の分析項目および分析方法は、表-1 に示す方法によった。また、粉末 X 線回折法により泥岩ずりの鉱物を分析した。

吸着試験に用いた天然材料には、重金属等の吸着¹⁾に寄与する非晶質アルミニウム・鉄含有量の異なる火山性土を用いた。試料は、北海道土壌²⁾を参考に火山性土が分布する土取り場を 5 箇所から選定し採取した。これら 5 試料を風乾し、2mm ふるいを通過したものを試験に供した。

表-1 分析項目および分析方法の一覧

分析項目	分析方法
ヒ素(As)	ICP質量分析法 (JIS K0102 61.4)
ホウ素(B)	ICP質量分析法 (JIS K0102 47.4)
鉄(Fe)	ICP発光分光分析法 (JIS K0102 57.4)
アルミニウム(Al)	ICP質量分析法 (JIS K0102 58.5)
pH	ガラス電極法 (JIS K0102 12.1)
シリカ(SiO ₂)	モリブデン青吸光度法 (JIS K0101 44.2)
カルシウム(Ca)	フレイム原子吸光法 (JIS K0102 50.2)
硫酸イオン(SO ₄)	イオンクロマトグラフ法 (JIS K0102 41.3)
酸化還元電位(Eh)	白金電極法 (1997版 河川水質試験方法(案) II-6)

2.1.2 吸着試験方法

蒸留水に泥岩ずりを液固比 2 の割合で投入し、環境庁告示第 46 号の付表で示される方法を準用した溶出試験により溶液を作製した。さらに、作成した溶液を、窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で蒸留水に 1 時間窒素バブリングを行い脱気水の吸着試験用溶液とした。同じく作製した溶液に電動歯ブラシで気泡を微細化しながら水素ガスバブリングを行い、吸着試験用溶液(水素水溶液)を作製した。作製した各溶液を分取し、3,000 rpm、20 分間の遠心分離した。その後、蒸留水溶液を 0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過し、脱気水および水素水溶液を窒素封入したグローブバック内でシリンジフィルター(孔径: 0.45 μm)により加圧ろ過し、初期濃度を把握する検液とした。

吸着試験は、蒸留水溶液が大気条件下で、脱気水溶液および水素水溶液については窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で、吸着試験用溶液に表-2 および表-3 に示す液固比の割合で各天然材料を投入した。さらに、水素水溶液については試験後の酸化還元電位の上昇を抑えるため、試料投入後の PVC ボトルをアルミ袋に入れ脱気封入した。これらを振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm

表-2 蒸留水および脱気水を用いた吸着試験の液固比

試料	液固比 (L/S)
SN	2, 5, 20, 50
KF	1, 2, 5, 50
OM	2, 5, 20, 50
NS	5, 20, 50, 200
MM	5, 20, 50, 200

表-3 水素水溶液を用いた吸着試験の液固比

試料	液固比 (L/S)
SN	5, 20, 50, 200
KF	
OM	
NS	
MM	

で 24 時間振とう後、3,000 rpm、20 分間遠心分離した。その後、溶液作製時と同様に固液分離し、ろ液を検液とした。検液中の As と B の濃度を ICP 質量分析法で測定し、Al と Fe の濃度を ICP 発光分光分析法で測定した。また、酸化還元電位(Eh)を白金電極法で測定した。

それら試験前後溶液の As 濃度と B 濃度から吸着量を求め、試験後の溶液濃度を平衡液相濃度として式 (1) に示すフロイントリッヒ型の吸着等温式に近似させた³⁾。求められた定数 k と n および平衡液相濃度から式 (2) より分配係数(Kd)を算出した。

$$Q = kC^n \tag{1}$$

$$Kd = \frac{dQ}{dC} = k \cdot n \cdot C^{n-1} \tag{2}$$

ここで、Q は試料への吸着量 (mg/kg-dry)、C は平衡液相濃度 (mg/L)、k、n は定数、Kd は分配係数 (L/kg) を示す。

2.1.3 中和・吸着剤の混合利用試験

重金属の溶出に加えて酸性化可能性を示す建設発生土を対象に、中和剤・吸着剤を用いた複合対策工の有効性を評価することを目的として、重金属を含む酸性浸出液の中和・吸着実験を実施した。

まず、中和剤、吸着剤単独での中和性能および吸着性能を確かめるため、容量 50 ml の遠沈管に試験液 20ml を加え、中和剤、吸着剤を液固比 0.0014~0.05 の割合で添加した。その後、200 rpm で 1 時間水平振とうを行い、孔径 0.45 μm のメンブランフィルターで濾過した溶液の pH、EC、ORP を測定し、化学組成を ICP 質量分析法により測定した。試験溶媒は、ヒ素を含む鉱山廃水を希釈したものを試験液 1 として使用した。

使用した中和剤・吸着剤はいずれも市販品であり、中

和剤は炭酸カルシウムを主成分とし、熱水洗浄したホタテ貝を温風乾燥後に、粉碎し製品化した資材である。一方、吸着剤は、溶融鉄を水アトマイズ法で微細粉末化した鉄粉製品で、回折X線分析では鉄 (Fe) 以外の不純物は確認されなかった。

次に、実現場での対策を想定し、ヒ素・セレン・鉛の溶出濃度が環境基準を超える試験液として、道内の鉱床地帯から地表採取した黄鉄鉱を大量に含む鉱化堆積岩を用いた水平振とう溶出試験を実施し、試験液2を作成した。試験方法は、岩石試料を2 mm以下に粉碎、500 ml ボトルに蒸留水300 ml と試料30 gを(固液比1:10)で封入し、6時間、200 rpmで水平振とうを行った。そして、振とう後の上澄み液を、孔径0.45 μmのメンブレンフィルターで濾過し、試験液2とした。そして作成した試験液2に中和剤・吸着剤を加えて、1時間、200 rpmでの水平振とうによる吸着試験を実施した。試験は、試験液20 mlに中和剤0.1 gを添加したものと、中和剤0.1 gと吸着剤0.05 gを添加したものの、計2ケースを実施した。

2.2 吸着層工法に関する文献調査

吸着層工法の、特に水の浸透に関する課題への対応に関する文献について、インターネットを利用して検索した。検索ワードは「吸着層」and「設計」and「盛土」とし、検索エンジンはgoogleを用いた。検索では59件が抽出されたが、このうち、重複、資材の広告などを除き、自然由来重金属等への対策工法に関するもの15件を抽出した。

また国土交通省新技術情報提供システム(NETIS)について、検索ワードは「吸着層」で検索した。その結果、8件を抽出した。

2.3 一般的な吸着層工法における水の流れのシミュレーションモデルの作成

一般的な吸着層工法における水の流れについて、課題を明らかにするため、2次元浸透流解析に使用される断面モ

デルを作成した。なお、解析に用いるソフトウェアはDtransu-2D・ELである。

表-4 泥岩ずりの粉末X線回折分析結果

	MS3
石英	○
斜長石	△
雲母類	—
方解石	△
スメクタイト	—
カオリナイト	—
菱鉄鉱	+
黄鉄鉱	—

凡例 ○:多量 △:中量
+:少量 —:微量

3. 研究結果

3.1 盛土と埋土を想定したバッチ吸着試験

3.1.1 粉末X線回折分析結果

試験に用いた泥岩ずりの粉末X線回折分析結果を表-4に示す。表-4より泥岩ずりには、造岩鉱物として主に石英や斜長石が確認されたほか、粘土鉱物として雲母類、スメクタイト、カオリナイトが微量確認された。その他、方解石、菱鉄鉱、黄鉄鉱が確認された。

3.1.2 バッチ吸着試験結果

(1) 蒸留水溶液および脱気水溶液を用いた結果

平衡液相濃度と吸着量との関係を図-1に示す。同図中には吸着等温線を示す。Asでは、吸着量が0.18~35.9 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.001~0.306 mg/Lを示した。脱気水溶液のOMの一部を除き、平衡液相濃度の増加とともに概ね吸着量も増加した。また、Bでは、吸着量が0.33~27.0 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.55~1.25 mg/Lを示した。Asと同様に平衡液相濃度の増加とともに吸着量が増加した。その結果を(1)式で近似した吸着等温線(図-1)の定数k、nおよびその決定係数R²を表-5に示す。図-1に示される5試料全ての吸着等温線について内挿計算可能な平衡液相濃度(As:0.1 mg/L、

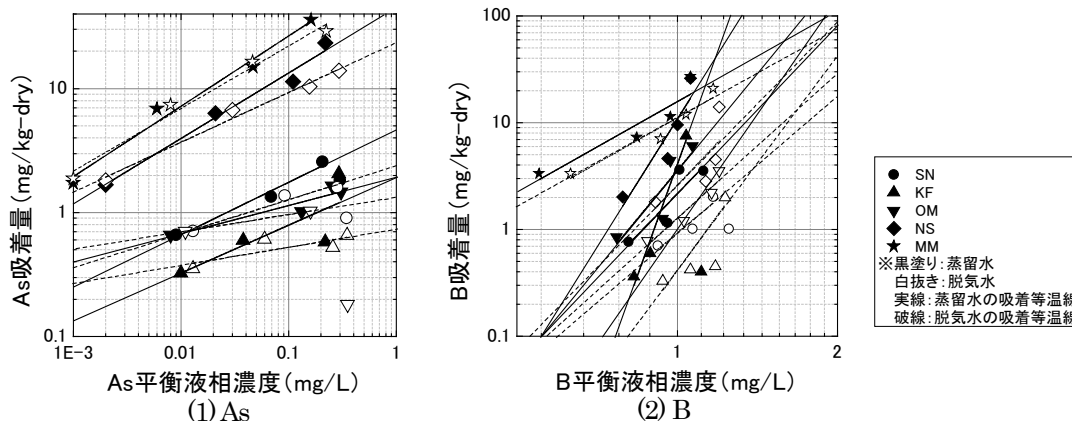


図-1 平衡液相濃度と吸着量との関係

B : 1.0 mg/L) および、定数 k 、 n を(2)式に代入して K_d を算出した。

蒸留水溶液の分配係数と脱気水溶液の分配係数との関係を図-2 に示す。図-2 より、蒸留水溶液の K_d と比較して、脱気水溶液の K_d は As で約 7 割程度、B で約 2 割程度であった。すなわち、これは酸化還元電位が低下すると、天然材料への As と B の吸着性能が低下することを示唆している。

吸着試験後 Eh と吸着量との関係を図-3 に示す。蒸留水溶液の Eh は 326~450 mV を示し、脱気水溶液の Eh

は 265~389 mV を示した。蒸留水溶液と脱気水溶液の Eh の差は、平均 74 mV であった。蒸留水溶液と脱気水溶液の各天然材料の最大吸着量を比較すると、As では OM を除き SN で 2.58 mg/kg-dry から 1.59 mg/kg-dry、KF で 5.76 mg/kg-dry から 0.52 mg/kg-dry、NS で 23.4 mg/kg-dry から 13.9 mg/kg-dry、MM で 35.9 mg/kg-dry から 28.9 mg/kg-dry にそれぞれ低下した。B では、すべての天然材料で脱気水溶液の最大吸着量が低下し、SN で 3.52 mg/kg-dry から 0.40 mg/kg-dry、KF で 7.52 mg/kg-dry から 2.00 mg/kg-dry、OM で 6.05

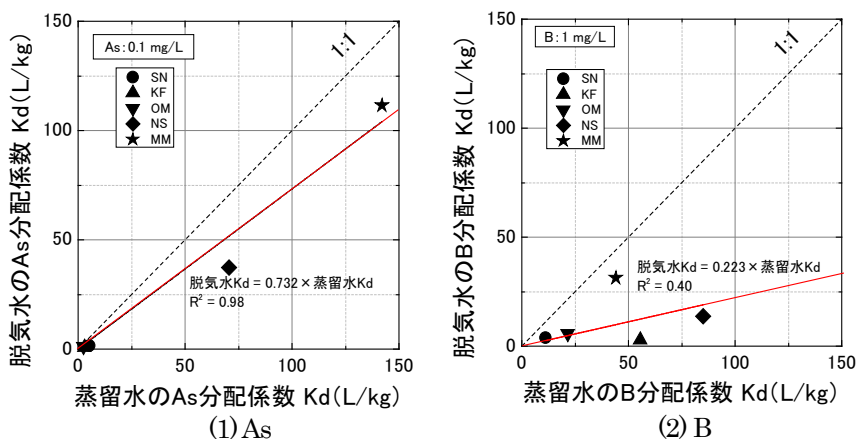


図-2 蒸留水溶液の分配係数と脱気水溶液の分配係数との関係

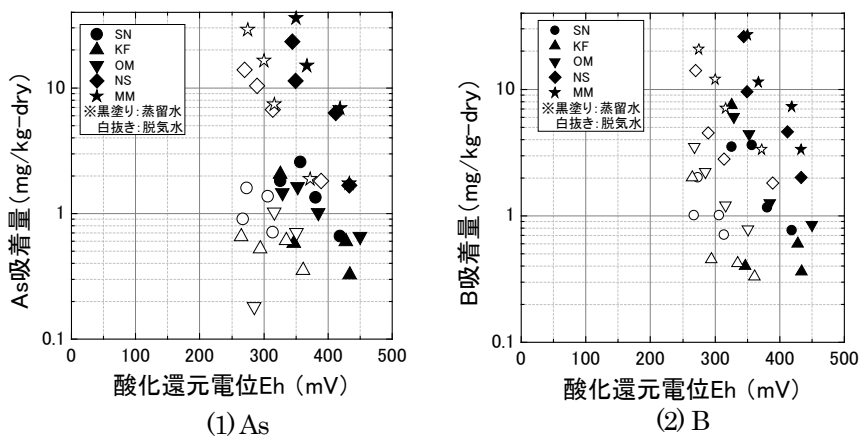


図-3 吸着試験後 Eh と吸着量との関係

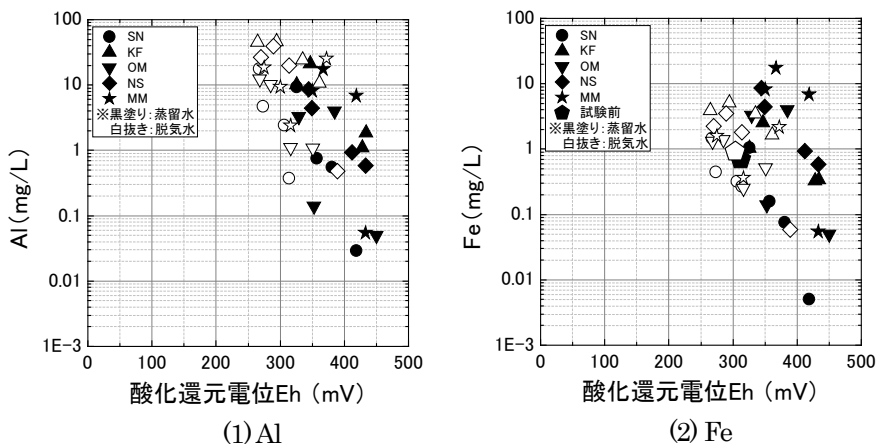


図-4 吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係

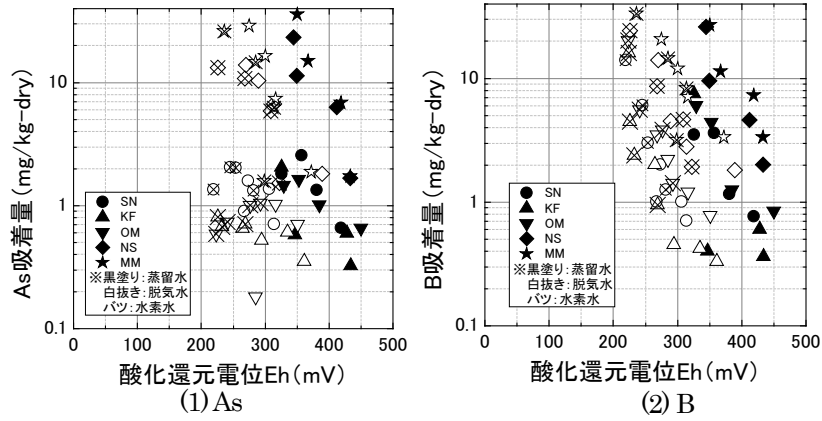


図-5 吸着試験後 Eh と吸着量との関係

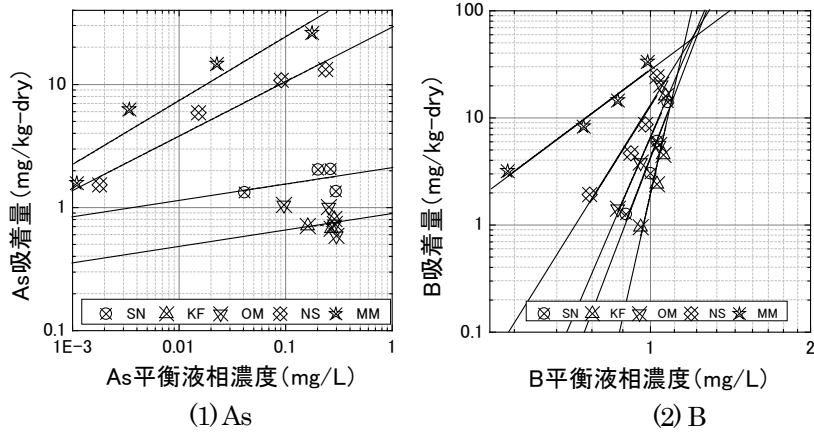


図-6 平衡液相濃度と吸着量との関係

mg/kg-dry から 3.53 mg/kg-dry、NS で 26.2 mg/kg-dry から 14.1mg/kg-dry、MM で 27.0 mg/kg-dry から 20.8 mg/kg-dry にそれぞれ低下した。

また、吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係を図-4 に示す。酸化還元電位が低下すると、ほとんどの試料で Al と Fe が増加した。特に Al の増加量が大きい。蒸留水溶液と脱気水溶液の各天然材料の最大増加量は、Al では SN で 9.33 mg/L と 17.7 mg/L、KF で 10.0 mg/L と 44.6 mg/L、OM で 0.14 mg/L と 10.3 mg/L、NS で 4.42 mg/L と 39.4 mg/L、MM で 0.054 mg/L と 25.0 mg/L とそれぞれ示した。Fe では SN で 1.04 mg/L と 1.47 mg/L、KF で 0.324 mg/L と 3.44 mg/L、OM で 0.078 mg/L と 1.40 mg/L、NS で 0.457 mg/L と 3.48 mg/L、MM で 0.008 mg/L と 2.15 mg/L とそれぞれ示した。これらは、酸化還元電位の低下にともない天然材料に含まれるアロフェンや非晶質鉄鉱物が分散溶解し、コロイドとなっている液中に存在したことによりヒ素とホウ素の吸着量が低下したと考えられる。

(2) 水素水溶液を用いた結果

吸着試験後 Eh と吸着量との関係を図-5 に示す。蒸留水溶液の Eh は 326 ~ 450 mV を示し、脱気水溶液の

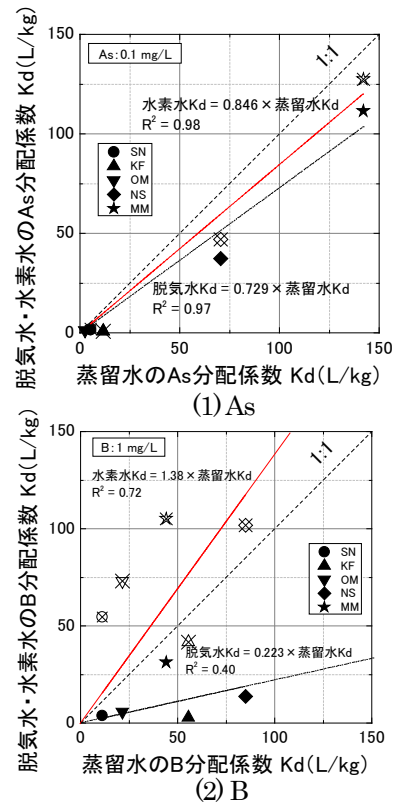


図-7 蒸留水溶液の分配係数と脱気水・水素水溶液の分配係数との関係

表-5 蒸留水・脱気水を使用した実験結果における、吸着等温式より求めた定数の一覧

試料	As						B					
	k		n		R ²		k		n		R ²	
	蒸留水	脱気水	蒸留水	脱気水	蒸留水	脱気水	蒸留水	脱気水	蒸留水	脱気水	蒸留水	脱気水
SN	3.44	1.53	0.35	0.15	0.89	0.38	2.16	0.93	5.17	4.16	0.79	0.89
KF	1.93	0.74	0.39	0.15	0.62	0.64	4.00	0.41	13.9	6.85	0.98	0.89
OM	1.93	1.33	0.23	0.14	0.9	0.99	3.56	1.27	6.04	4.54	0.77	0.93
NS	45.2	23.4	0.53	0.40	0.98	0.99	10.7	2.59	7.92	5.28	0.86	0.59
MM	98.2	70.6	0.66	0.50	0.98	0.98	15.7	11.1	2.81	2.82	0.87	0.94

表-6 水素水溶液を使用した実験結果における、吸着等温式より求めた定数の一覧

試料	As			B		
	k	n	R ²	k	n	R ²
SN	2.10	0.13	0.24	4.23	12.9	0.94
KF	0.84	0.10	0.11	1.92	21.7	0.81
OM	—	—	—	6.47	11.3	0.89
NS	29.4	0.44	0.96	12.84	7.92	0.97
MM	81.1	0.52	0.90	28.26	3.72	0.87

Ehは265～389 mV、水素水溶液のEhは219～322 mVを示した。蒸留水溶液と脱気水溶液のEhの差は平均74 mVであり、蒸留水溶液と水素水溶液のEhの差は平均117mVであった。この結果から、岩石ずりの溶出溶液に水素ガスバブリングした溶液を用いることは、より還元的な環境を再現するバッチ吸着試験方法として有効であると考えられる。

また、水素水溶液の平衡液相濃度と吸着量との関係を図-6に示す。直線は吸着等温線を示す。Asの吸着量が0.60～26.1 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.001～0.301 mg/Lを示した。平衡液相濃度の増加とともに概ね吸着量も増加した。また、Bの吸着量が1.0～33.2 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.50～1.10 mg/Lを示した。Asと同様に平衡液相濃度の増加とともに吸着量が増加した。その結果を(1)式で近似した吸着等温線(図-7)の定数k、nおよびその決定係数R²を表-5に示す。図-7に示される5試料全ての吸着等温線について内挿計算可能な平衡液相

表-7 中和剤・吸着剤の性能評価結果

単位 mg/L	試験液 ① (鉱山廃水)	試験液 + 中和 材0.05g	試験液 + 中和 材0.1g	試験液 + 中和 材0.5g	試験液 + 中和 材1g	試験液 + 吸着 材 0.028g	試験液 + 吸着 材 0.112g	1:10 溶出試験 結果 試験液②		
								溶出試 験+ 中和材 0.1g	溶出試 験+ 中和材 0.1g+ 吸着材 0.05g	溶出試 験+ 中和材 0.1g+ 吸着材 0.05g
Na	3.07	5.03	5.10	6.33	7.55	3.12	3.07	0.23	17.5	10.6
Mg	1.49	1.74	1.93	2.18	2.52	1.49	1.48	<0.489	2.76	1.93
Al	8.84	<0.034	<0.034	<0.034	<0.034	<0.034	<0.034	0.49	0.72	<0.034
Si	3.34	1.76	1.81	1.98	1.89	2.09	<0.295	<0.295	<0.295	<0.295
S	45.2	49.4	46.9	46.4	48.9	45.6	36.3	196.2	398.5	552.1
K	51.57	0.88	1.06	1.28	1.44	1.18	1.03	<0.231	0.48	<0.231
Ca	1.64	20.6	21.6	23.0	22.2	1.53	1.65	0.19	44.95	42.99
Ti	0.088	0.040	0.044	0.044	0.046	<0.015	<0.015	0.36	0.07	0.07
Mn	0.31	0.25	0.22	0.08	0.04	1.50	3.11	0.17	1.30	4.03
Fe	59.8	<0.104	<0.104	<0.104	<0.104	196.6	144.2	611	1452	2164
Ni	0.053	<0.023	<0.023	<0.023	<0.023	0.050	<0.023	0.120	0.170	<0.023
Zn	0.054	0.053	0.020	0.041	0.019	0.167	0.034	0.310	0.334	0.035
As	1.629	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.431	0.064	<0.01
Se	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036	0.522	0.163	<0.036
Sr	0.075	0.733	0.783	0.983	1.092	0.072	0.069	<0.025	3.58	2.67
Cd	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.004	0.015	<0.001
Ba	0.091	0.075	0.060	0.065	0.062	0.129	0.117	0.044	0.068	0.099
Pb	0.028	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	2.13	2.56	<0.003
pH	2.5	3.63	6.2	6.53	6.83	4.47	4.66	2.19	3.04	5.76
EC mS/m	194.5	104.8	111.8	117.2	119	84.6	67.8	518	506	608
ORP mV	610	149	132	134	137	131	25	426	333	-205

濃度(As:0.1 mg/L、B:1.0 mg/L)および、定数k、nを(2)式に代入してKdを算出した(表-6)。

蒸留水溶液の分配係数と脱気水・水素水溶液の分配係数との関係を図-7に示す。蒸留水溶液のKdと比較して、脱気水溶液のKdはAsで約70%程度、水素水溶液で約85%程度であった。一方、Bでは脱気水溶液で約20%程度であったものが、水素水溶液では約140%程度となった。これは酸化還元電位が低下すると、天然材料へのAsの吸着性能が低下するが、Bの吸着性能が向上することを示唆している。

3.1.3 中和・吸着剤の混合利用試験結果

ヒ素を含む酸性水を試験液とした中和剤・吸着剤の混合吸着試験を実施した。資材の配合量、試験後の水質および元素濃度の測定結果を表-7に示す。

1) 炭酸カルシウム系中和剤による酸性水の中和実験結果

ホタテ貝を用いた中和剤をpH2.5の酸性水に添加した中和試験では、固液比が0.005(添加量0.1g)以上の条件で環境排水基準のpH5.8を満足すること、添加量0.1gの時点で、電気伝導度が194.5 mS/mから111.8 mS/mまで低下し、酸化還元電位が610 mVから132 mVまで還元方向へ液性が変化することが確認された。また、中和剤を添加した試験前後で、沈殿の形成は認められなかった。

表-7、図-8で示されるように元素濃度の変化を見ると、炭酸カルシウム系の中和剤を添加した試験後の元素濃度は、Ca、Sr濃度の明瞭な増加と、添加量に対して、Na、Mg、Sr濃度が増加傾向を示すことが明らかとなった。pH、EC、ORPと同様に、Ca濃度は0.1g(固液比0.01)以上の添加でほぼ平衡に達した。As濃度は初期1.629 mg/Lから環境基準値(0.01 mg/L)以下まで低減した。また、Asに加えて、Al、K、Fe、Mn濃度の低下が確認された。Mn濃度に関しては、添加量に対して減少する傾向が認められた。ホタテ貝殻はCaを主成分としており、Na、Mg、Srも副成分として含まれる元素である。従って、中和剤が酸性溶液により溶解することで、溶液と中和剤のCa濃度が平衡に達し、炭酸カルシウム・水酸化カルシウムの再形成が生じていると解釈される。一方、Na、Mg、

Sr 濃度の増加は、Ca が平衡濃度に達した後も、試料添加量に応じて反応面積が増加したことで溶出量が増加したと解釈される。K 濃度は中和剤の添加により大きく減少するが、添加量が増加すると微増しており、Mn の減少と共に、中和・共沈反応に関わる挙動と考えられるが現在のところメカニズムは不明である。一方、Al、Fe、As 濃度は初期濃度の 1%以下まで低下しており、水酸化物として沈殿、あるいは中和剤表面に吸着が想定されるが、肉眼レベルで沈殿の形成は確認されず、反応生成物の解明にはより詳細な解析が必要であろう。このように、ホタテ貝由来の中和資材には、中和能力の発揮と共に資材由来の元素の添加と、ヒ素の吸着能も有することが明らかとなった。

2) 鉄系吸着剤による酸性水の重金属吸着実験結果

鉄系の吸着剤を用いた実験結果を表-7、図-8 および図-10 に示す。鉄系吸着剤の添加では、pH が 4.5 付近まで低下し pH 緩衝能を有すること、電気伝導度、酸化還元電位も還元側に低下することが分かった。この pH 上昇は、Fe²⁺ の酸化反応によるものと解釈される。

鉄系吸着剤では、鉄の表面に As を吸着する性質が広く

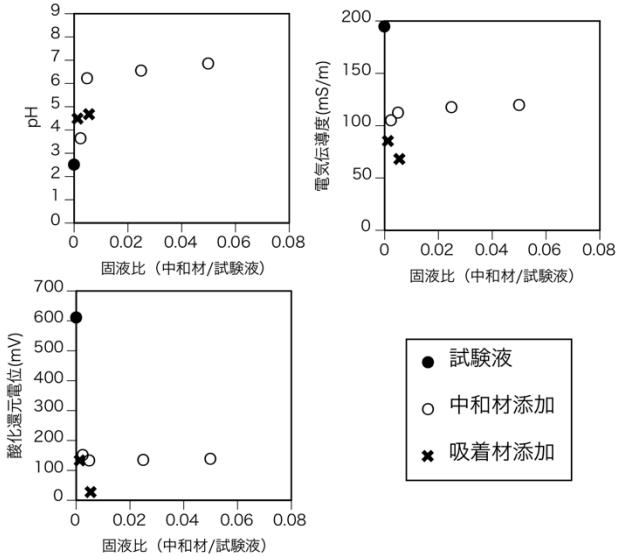


図-8 中和剤・吸着剤添加試験の pH、EC、ORP 測定結果

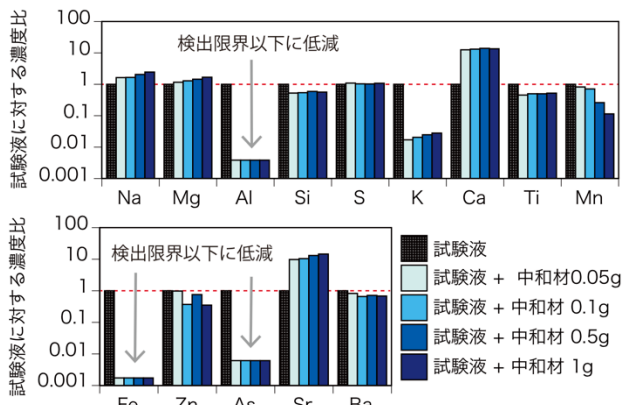


図-9 炭酸カルシウムを用いた中和剤の中和試験結果

知られており、本実験で用いた吸着剤も液個比 0.0002 の条件で、As を検出限界以下濃度まで十分に低減させる能力を示した。As 以外の元素の挙動として、Fe、Mn の増加が認められたことから、本吸着剤は Fe 以外の成分として Mn を含み、溶出させる可能性が示された。中和剤同様に Al、K の減少が認められた。Al は恐らくは水酸化物として沈殿したためと解釈されるが、K の減少がどのような反応による結果であるのかは、現状では明らかではない。

3) 中和剤・吸着剤の混合吸着試験結果

中和剤と吸着剤を同時に用いた実験結果を表-7、図-8 および図-11 に示す。作成された試験液 2 は、鉱山廃水を用いた試験液 1 に比べて、pH が 2.19 とより酸性であり、Fe 濃度で約 10 倍の 611 mg/L、S 濃度で約 4 倍の 195 mg/L であった。また、As 0.43 mg/L、Se 0.522 mg/L、Pb 2.13 mg/L と環境基準値 0.01 mg/L を大きく超える溶出量を示した。

この試験液 2 に中和剤 0.1g を添加した場合、pH は 3.04 とわずかな中性化に留まった。As 濃度は、試験液 1 を用いた実験結果よりも低減量が小さい 0.064 mg/L (試験液

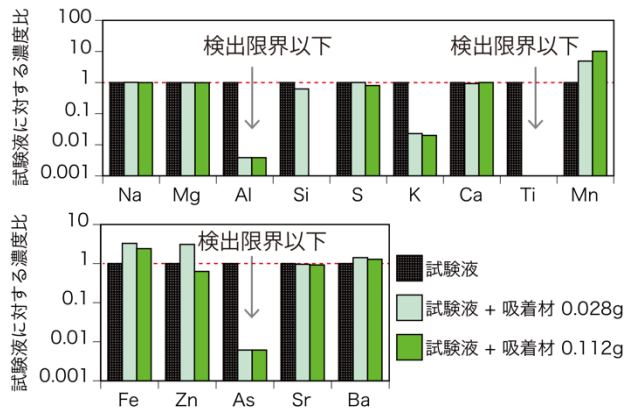


図-10 鉄系吸着剤の吸着試験結果

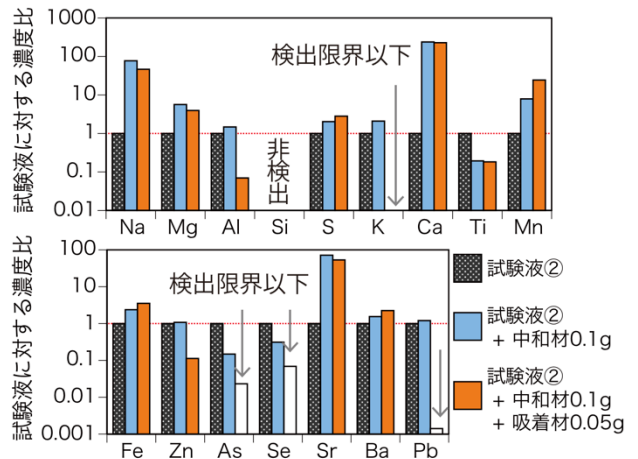


図-11 中和剤・吸着剤の同時使用時の吸着実験結果

の15%)となった。また、Se濃度の低減効果も認められ0.163 mg/L(同31%)を示した。一方で、Pb濃度は2.56 mg/Lとわずかに増加したが、測定誤差範囲内の変化であると考えられる。

また、建設発生土から発生した酸性水を吸着層工法で対策する方法を想定し、試験液2に中和剤0.1g(と吸着剤0.05gを同時に添加したケースでは、試験液のpHは5.76に中性化され、反応後の溶液には茶色の沈殿物が生成された。沈殿物の回折X線分析を行ったところ、水酸化鉄(ゲーサイト)からなることを確認した。試験後の重金属濃度としてAs、Seに加えて、Pb濃度も環境基準を満足する検出限界以下まで低下させる性能を確認した。また、溶液中のFe、S濃度は増加する傾向が認められた。これは、0.45 μ m以下の沈殿生成物が十分に除去できなかった可能性が考えられる。また、Na、Mg、Ca、Srの増加は中和剤の溶解に伴う溶出に由来すると解釈される。Mnは中和剤のみの場合も、中和剤と吸着剤を併用した場合の両者で増加する傾向が認められた。このように、中和剤と吸着剤を併用することで、溶液の中和と重金属の吸着能に加えて、中和・吸着に関与する元素濃度の変化を検証することができた。また一方で、中和反応により溶液中の鉄分が水酸化鉄として沈殿を形成するケースもあり、建設発生土由来の高濃度のFeやSを含む酸性水の対策では、酸素含有量、pH、地質試料の特性に応じた溶出元素の違いなどに対応した、中和剤・吸着剤の選定が必要であることが示された。

このように室内での短期吸着試験により、中和剤・吸着剤の中和性能・重金属吸着性能の個別評価に加えて、その際に規制対象となる重金属以外の元素類の挙動を測定することで、中和・吸着性能における影響要因を推察可能となる。今後は、カラム試験や盛土試験における、中和・吸着性能の長期的安定性の検証、未粉碎の岩石ズリの利用有姿形態における不溶化・中和工法の実効性や評価方法について、引き続き検討を行う。

3.2 吸着層工法に関する文献調査結果

吸着層内の水の流れに関しては、不飽和浸透条件であると考えられ、浸透の不均等(フィンガリング)が起こる。また、吸着層の上面に傾斜がある場合には、浸透の不均等が起こり、その結果、吸着層は想定より早く破過する(吸着能力がなくなる)ことが想定される。

浸透の不均等に対する対策として、カラム試験による実験的検討により、吸着層の上位に珪砂層を設けて、水の浸透を均質化することができるとの報告⁴⁾がされている。また対策工法として、水の浸透を均質化する目的で、吸着資

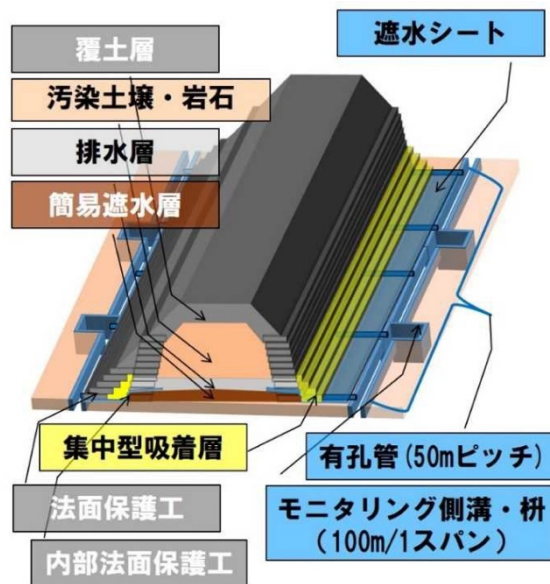


図-12 吸着層工法の盛土構造(案)⁸⁾

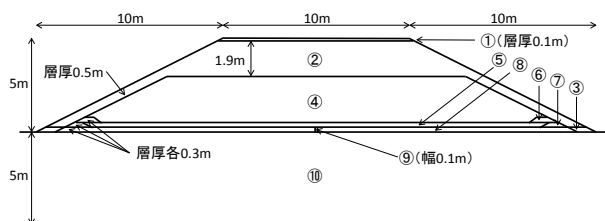


図-13 吸着層断面図(盛土1:底面が水平な場合)

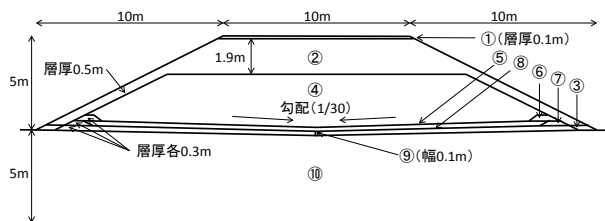


図-14 吸着層断面図(盛土2:中心部が沈下した場合)

表-8 検討を行う吸着層断面構成

断面部分	モデルA	モデルB	モデルC	モデルD	モデルE	モデルF	モデルG	モデルH	モデルI
①	舗装	覆土	舗装	覆土	舗装	覆土	舗装	覆土	覆土
②	覆土								
③	排水層				覆土				
④	掘削ずり								
⑤	底部吸着層				掘削ずり				
⑥	側部吸着層		掘削ずり						
⑦	底部吸着層				側部吸着層		掘削ずり		
⑧	排水層				底部吸着層				
⑨	排水層				底部吸着層		亀裂		
⑩	基礎地盤								

材をフェルト様の透水性素材で挟み込んだものが開発されている⁵⁾⁷⁾。

吸着層に不具合が生じた場合の地下水汚染の可能性を低減させる工法として、重金属等含有盛土の下面に遮水構造を設け、のり尻付近に浸透水を集め、その部分に吸着層

を敷設する工法 (図-12) が考えられている⁸⁾。本方法は、排水管理や吸着層の交換が可能な構造である。

吸着層工法の最適配置を検討した龍原ほか⁹⁾によると、断面構造に関して、資材と重金属等含有土を均質混合した場合、複数の吸着層を設けた場合、および下面に1層吸着層を設けた場合の吸着性能の比較結果から、下面に1層設ける場合が最も効率的で、施工性もよいとしている。それは、吸着量が原液の濃度が高いほど大きくなるためであるという。本結果に基づけば、図-12の構造は吸着効率の観点からも優れていると言える。

一方で、吸着層を水平に撒き出して築造する従来型の断面構造は、各種マニュアル類¹⁰⁾などにも示されており、十分な検討をせずに現場で数多く築造されているものと考えられる。

3.3 一般的な吸着層工法における水の流れのシミュレーションモデル

検討を実施する盛土は舗装や覆土の有無、吸着層の形状のバリエーション、吸着層底面の排水層の有無、吸着層底面の亀裂発生の有無を想定して、天端幅10m、盛土高さ5m、のり勾配2割とした図-13および図-14のような構造を想定して解析メッシュを作成した。図-13は底面が水平、図-14は盛土が沈下したイメージで、中心部に向かって1/30の勾配がついているものである。

図の①～⑩の部分を表-8に示す部分に対応するように設定を行い、モデルA～Iまでの9ケースについて二次元浸透流解析を実施し、吸着層工法における断面設計の検討を行う予定である。

モデルA～Dは底部吸着層の下位に排水層を設けた場合、モデルE～Hは底部吸着層の下位に排水層を設けない場合である。またそれぞれについて、天端を舗装とするか覆土とするか、および側部吸着層を設けるかどうかのバリエーションを設定したものである。なお、モデルIについては、吸着層の下半部に引っぱり亀裂が発生した場合を想定したモデルとしている。

4. まとめ

平成28年度から令和元年度で実施した研究結果を以下にまとめる。

- 1) ヒ素・ホウ素を含む蒸留水、脱気水および水素水溶液を試験溶媒として用い、盛土(酸化)と埋土(還元)を想定した天然材料のバッチ吸着試験を実施した結果、蒸留水溶液の分配係数と比較して、脱気水溶液の分配係数はヒ素で約7割程度、ホウ素で約2割程度であった。また、より還元的な環境を模した水素水溶液

を溶媒に実験した結果、酸化還元電位が概ね400mVから250mVまで低下すると、Asの吸着性能が約70～85%に低下し、Bの吸着性能が約140%程度に向上することが示唆された。

今後は、還元環境を再現するバッチ溶出・吸着試験方法の信頼性向上のため、引き続きデータの蓄積を図り、実大盛土試験などにより実測値との比較検証を行っていく予定である。

- 2) 実現場で対応が求められている重金属溶出に酸性化を伴う建設発生土対策の評価法を検討した。炭酸カルシウム系の中和剤と鉄系の吸着剤を同時使用した場合、十分な中和効果を示すと共に、ヒ素、セレン、鉛の不溶化効果が確認された。今後、繰り返し抽出やカラム試験による長期安定性の確認が必要であろう。一方で、浸出液の液性の違いにより、水酸化鉄等の沈殿生成物が形成される事例が確認された。これは、吸着層工法における透水性を変化させ長期安定性を評価する上で考慮すべき条件であると考えられる。
- 3) 吸着層工法における、盛土中の水の流れの不均等への対策に関して文献調査をした結果、有望な技術が見いだされた。一方、従前の断面構造は各種マニュアル類にも示されており、今後は詳しい検討の元に改訂していく必要があると考える。
- 4) 一般的な吸着層工法における水の流れについて、課題を明らかにするため、2次元浸透流解析の解析メッシュを作成するとともに検討ケースを整理した。

参考文献

- 1) 日本地下水学会編：地下水・土壌汚染の基礎から応用、理工図書、pp.127-132、2006
- 2) 北海道農業試験場：北海道土壌図 農牧地および農牧適地 60万分の1、1985
- 3) 独立行政法人土木研究所編：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル [改訂版]、鹿島出版会、pp.130-132、2012
- 4) 田中真弓、川端淳一、河合達司、今立文雄、中山賢治：吸着層工法の合理的設計・施工方法検討のための室内試験、土木学会第66回年次学術講演会、pp.559-560、2011
- 5) JFE ミネラル株式会社、有限会社アイコス、株式会社北陽、株式会社ハブ：重金属吸着マットによる吸着層工法、新技術情報提供システム、国土交通省ホームページ、<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/NewIndex.asp> (2020.7 閲覧)
- 6) 株式会社アムロン、鹿島建設株式会社、株式会社テザック：KAT Beads マット (カットビーズマット)、新技術情

9 持続可能な建設リサイクルのための社会インフラ建設技術の開発

報提供システム、国土交通省ホームページ、

<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/NewIndex.asp>

(2020.7 閲覧)

- 7) 東洋紡株式会社：有害物質拡散抑制材料である重金属イオン吸着シート「コスモフレッシュ NANO」、新技術情報提供システム、国土交通省ホームページ、

<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/NewIndex.asp>

(2020.7 閲覧)

- 8) 環境省：「平成 28 年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査対策技術検討調査」対象技術の評価結果について、環境省ホームページ、

<https://www.env.go.jp/press/104700.html> (2020.7 閲覧)

- 9) 龍原毅、直原俊介、巽隆有、五十嵐敏文：掘削ざりからのヒ素溶出対策のための吸着層設置位置の検討、地盤工学ジャーナル、Vol.10、No.4、pp.635-640、2015

- 10) 北海道環境保全技術協会技術委員会：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削度対策の設計・施工マニュアル、84p.、北海道環境保全技術協会技術委員会、2017