

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 2 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。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ことが分かった。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 を使用できる目途が立ったので、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。さらに、97 の文献調査の結果より、再生骨材の品質区分に応じて圧縮強度の発現が頭打ちとなる場合があること、乾燥収縮は再生細骨材よりも再生粗骨材の影響が大きいことを確認した。この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、収縮低減剤の使用が耐凍害性に悪影響を及ぼさないことを確認した。また、再生細骨材の有効利用の可能性について検討を行った。再生粗骨材と同じ原コンクリートから、同様のプロセスで製造した再生細骨材の使用が、再生骨材コンクリートの強度、乾燥収縮、塩分浸透抵抗性および凍結融解抵抗性に与える影響について検討した。この結果、再生細骨材の使用が再生粗骨材の使用以上に不利となる傾向は確認されなかった。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。

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り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・再生を複数回繰り返し実施し、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、および混合物の性状については、添加剤の組成や再生骨材混合率の違いの影響が高温でのひび割れ抵抗性に現れやすいことがわかった。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。その結果、北海道北部地域での凍上抑制層への適用に問題がないこと、および歩道路盤材への利用により歩道舗装の耐久性向上効果が期待できるとの結果を得た。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。また、圧裂係数が規格 1.70MPa/mm を超える場合には、針入度 80-100 に該当する設計圧裂係数範囲までに回復させるには、さらなる再生手法の検討が必要であることがわかった。

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、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、室内での促進

劣化や屋外暴露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、劣化後の再生中温化アスファルト混合物の性状変化に対する締固め度の影響を検討した。その結果、圧裂強度や圧裂係数は締固め度の低下に伴い、値が下がることを確認した。さらに、劣化後の高温カンタブロ損失率は締固め度の低下に伴い、増加する傾向が見られた。いずれの性状変化についても、中温化技術の種類や再生用添加剤による影響は比較的小さかった。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、短期溶出試験と土研式雨水曝露試験との結果比較に基づいて、適切な発生源濃度を把握するためには、現状ではいずれの元素についても曝露試験などの実現象再現溶出試験の実施が必要であることを示した。また、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。

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象に近い試験方法であることを示した。さらに、脱気水を用いた飽和上向流カラム溶出・吸着試験方法を開発・試行したところ、本方法により短時間で低酸素環境を形成できることを確認した。実験結果から、本方法が低酸素環境による溶出特性の把握に有効な試験方法であることが示された。

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 naturally occurring heavy metals. 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 naturally occurring heavy metals 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 naturally occurring heavy metals, 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、島多昭典、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。また、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。令和2年度は、再生骨材使用時の圧縮強度や乾燥収縮量等に関する文献調査、および再生細骨材の有効利用の可能性の検討を行った。

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には耐凍害品が制定され、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生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する場合の影響や、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。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年3月に

表-1 主な研究課題と分担

課題	H28	H29	H30	R1	R2	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
普通骨材との混合使用		○	○	○	○	耐寒材料T
再生細骨材の有効利用		○			○	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			○	○		東北技術事務所、宮城大学との共同研究

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「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)」をとりまとめた。令和 2 年度は、再生骨材使用時の圧縮強度や乾燥収縮量等に関する文献調査を行うとともに、再生細骨材の有効利用の可能性について検討を行った。

2. 平成 28～令和元年度の研究概要

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 JISA 1148 (A 法) を基本とし、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増大することや、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。

乾燥収縮抑制対策として、収縮低減剤の効果を確保するとともに、収縮低減剤を使用しても耐凍害性が確保できることを確認した。

2.4 再生細骨材の有効利用 (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 JISA 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。

2.5 再生プレキャストコンクリートへの有効利用

東北地方整備局東北技術事務所、宮城大学と平成 30 年 3 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粗骨材 M の有効利用方法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を対象に、凍結防止剤散布地域でも普通コンクリートと同等な耐久性を確保できる再生骨材コンクリートの条件を明らかにし、その内容をガイドライン (案) として整理した。

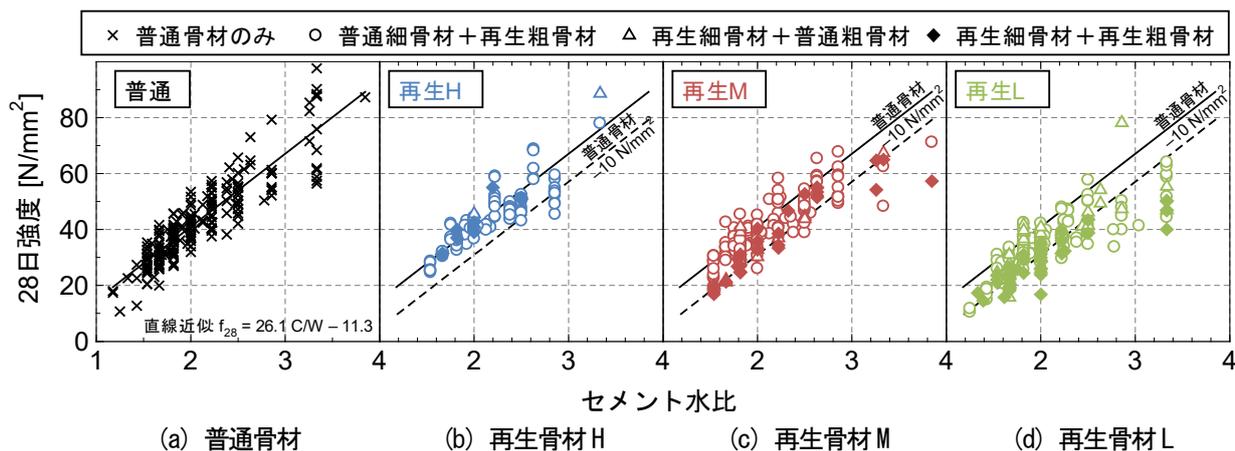


図-1 圧縮強度 (材齢28日)

また、再生粗骨材の耐凍害性を短時間で評価できる方法や、各種の耐久性に関する知見等を技術資料として整理した。

3. 令和2年度の研究内容

3.1 再生骨材の品質区分が強度・乾燥収縮に与える影響

再生骨材を用いたコンクリートでは、再生骨材に付着する低品質な旧モルタル分などの影響により、圧縮強度の低下や乾燥収縮量の増加が起きるとされている。しかし、圧縮強度試験や乾燥収縮試験には時間がかかるため、再生骨材の入荷時にこれらの影響を判断することは難しい。そこで、再生骨材が圧縮強度や乾燥収縮に及ぼす影響を確認するため、既往文献の調査を行い、整理検討を行った。文献調査ではコンクリート工学年次論文集に掲載された再生骨材に関する97文献（再生コンクリートH相当119配合、M相当207配合、L相当222配合）を対象とし、圧縮強度データ、乾燥収縮データを収集した⁴⁾。

コンクリートのセメント水比と材齢28日における圧縮強度の関係を骨材の品質区分別に整理した結果を図-1に示す。再生骨材Lのデータを集計した図-1(d)を見ると、セメント水比2.5(W/C=40%)を境として関係が変化しており、セメント水比の増加に対する強度の伸びが小さくなり、40~50 N/mm²程度で頭打ちの傾向を示している。これは使用する再生骨材の品質がコンクリートの強度に影響を与え、強度増加の制約要因となっていると考えられる。また、セメント水比2.5以下の領域でも、普通骨材に比べて圧縮強度が全体的に低い傾向を示している。図-1(c)に示す再生骨材Mでも同様の傾向があり、全体的な強度低下や、50~60 N/mm²程度での強度の頭打ちが確認できる。一方、図-1(b)に示す再生骨材Hでは、M,Lのような強度低下や頭打ちの傾向は見られず、普通骨材と同等

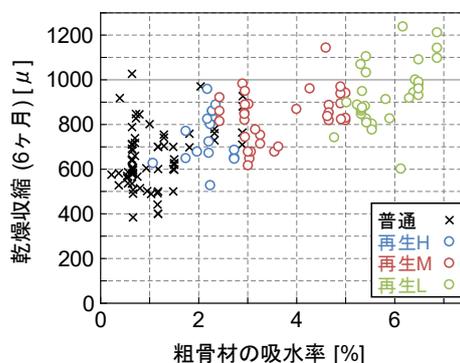


図-2 粗骨材吸水率と乾燥収縮量

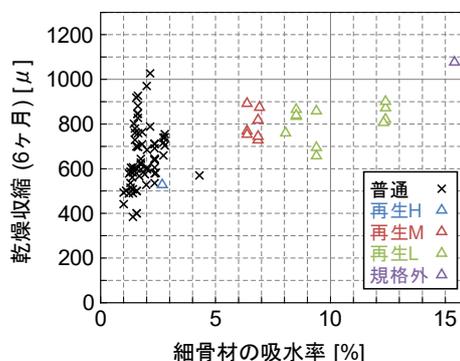


図-3 細骨材吸水率と乾燥収縮量

の強度を示した。

次に、粗骨材のみに再生骨材を使用した場合のコンクリートの6ヶ月乾燥収縮量を図-2に示す。図を見ると、吸水率の大きい再生骨材の場合ほど乾燥収縮も大きくなっており、粗骨材吸水率1%の増加に対して約60μの割合で増加する傾向が見られた。同様に、細骨材のみに再生骨材を使用した場合のコンクリートの6ヶ月乾燥収縮量を図-3に示す。再生細骨材についても、吸水率の増加に伴い乾燥収縮が増加する傾向があるものの、その増加量は

図-2 に示す再生粗骨材の場合に比べて小さい値となっている。以上より、再生細骨材のデータ数がやや少ないものの、今回収集した実験結果の範囲では、乾燥収縮へ及ぼす影響は再生粗骨材が主体的であると言える。

今後、吸水率と付着モルタルとの関係整理や、付着モルタルに起因する乾燥収縮増加量の実験的検討、地域毎の使用骨材（原骨材）と乾燥収縮量に関する調査を行い、コンクリートの用途に応じた適正な再生骨材使用量の目安を提案していきたい。

3.2 再生粗骨材の塩分量測定方法に関する検討

再生骨材コンクリート H, M, L の JIS の解説では、再生粗骨材が含有する塩化物量を JIS A 1154 によって測定する場合、2,000g 以上の試料を 5mm 粉砕することが推奨されており、一般的な塩化物量測定に比べて試験に要する労力が大きい。試料の必要量が大きく設定されている理由としては、サンプリング試料中の付着モルタル量がばらつくことと、付着モルタルに蓄積する塩分量が骨材毎にばらつくことの2つが挙げられる。今回、これらのばらつきの程度を調査することを目的に、北海道、東北、北関東で生産され

た M 骨材 6 種類、L 骨材 14 種類を対象として塩化物量を調査した。調査では、100g の再生骨材をサンプリングした上で微粉碎した試料に対し、全塩分量測定（JIS A 1152）と塩酸による不溶解残分量測定を実施することを、再生骨材 1 種類あたり 3 回（計 300g）繰り返した。

塩化物量の測定結果を図-4 に示す。また、塩化物量を不溶解残分量で補正した付着ペースト中の塩化物量を図-5 に示す。図-4 と図-5 を見比べると、不溶解残分量で補正した場合であっても、そのばらつきはほとんど変わらない結果となった。そのため、サンプリング試料中の付着モルタル量のばらつきが塩化物量のばらつきに及ぼす影響は小さい結果となった。

一般的に、コンクリートが含有する塩分には内在塩と外来塩があり、内在塩は原コンクリート中に均一に分布する一方で、凍結防止剤などの外来塩はコンクリートの表面側で多く蓄積することからサンプリング試料毎に差が生じる一因となり得る。内在塩分量としては、JIS A 5308 では塩化物イオン量 0.3 kg/m^3 以下と規定されているため、これを破碎して製造される再生骨材中の塩化物イオン量も 0.3 kg/m^3 以下と想定される。これをペースト中の全塩化物量に換算すると約 0.1% 以下となる。図-5 を見ると半数近くの試料では外来塩の影響を受けている可能性があり、そのような場合にはバラツキも大きくなっている。そのため、外来塩の影響を受ける場合には 100~300g 程度の少量での測定では不十分と考えられる。その一方で、飛来塩分や凍結防止剤等の外来塩の影響を受けない地域で解体、製造される再生骨材に関しては、塩化物量試験の試料の量を減らせる可能性がある。

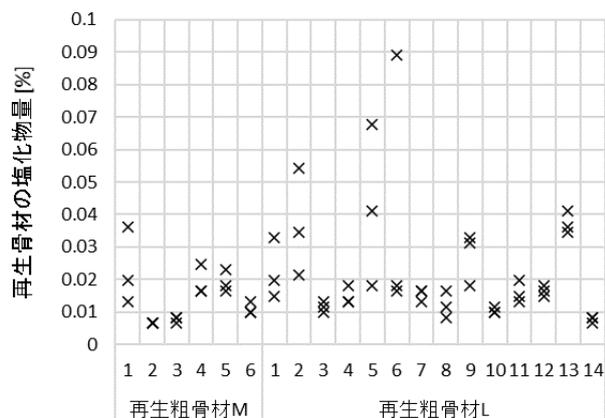


図-4 再生粗骨材中の塩化物量

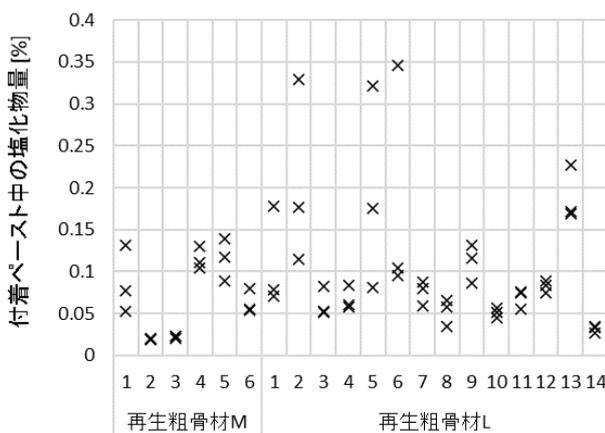


図-5 付着ペースト中の塩化物量

3.3 再生細骨材の利用がコンクリートの強度・耐久性に与える影響

再生粗骨材の有効利用について検討を進めてきた成果に関しては 2.5 で述べたガイドライン（案）に整理した。これに対して再生細骨材の有効利用の検討はやや遅れているといつてよい。例えば、再生粗骨材の耐凍害性の照査方法は確立したが、再生細骨材に関しては照査法が無いなどである。

再生細骨材の有効利用の可能性を探るために、再生細骨材の利用が再生骨材コンクリートの強度や耐久性に与える影響に関して実験的な検討を行った。実験は平成 28 年度、30 年度および令和 2 年度の 3 ヶ年に渡って実施しており、令和 2 年度はそれらを取りまとめて考察した。

検討内容としては、コンクリート解体材から、再生粗骨材と再生細骨材を製造し、それらを用いたコンクリート

を製造し、圧縮強度や各種の耐久性試験を実施した。コンクリート解体材は表-2に示す7種類であり、解体材Cは実験室で製造したコンクリート版（水セメント比W/C60%、空気量2%）を砕いたもの、それ以外は市販の再生クラッシュランである。これらをジョークラッシュヤで破碎後、粒径5~20を粗骨材、5mm以下を細骨材とした。なお、解体材Mのみはジョークラッシュヤの破碎後にコンクラッシュヤとロッドミル（破碎力調整のためにロッドの代わりに鉄筋を使用）を使用した湿式の破碎を実施した。

再生骨材コンクリートの配合は、水セメント比W/C55%、細骨材率s/a46%、目標空気量4.5%と統一し、練上りのスランプが6.5cm以上となるように単位水量Wを調整した結果、Wは172~195kg/m³となった。

混練水には水道水、セメントには普通ポルトランドセメント、混和剤にはAE減水剤とAE助剤を使用した。使用骨材には、粗骨材か細骨材のいずれか一方に再生骨材を100%使用することとし、再生骨材以外には、粗骨材として良質な硬質砂岩砕石、細骨材として良質な川砂を使用し

表-2 再生骨材の品質

解体材	細骨材			粗骨材			
	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	区分	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	FM凍害指数	区分
H	2.17	8.10	L	2.29	5.68	0.060	L
T	2.01	12.07	規格外	2.26	6.63	0.076	L
L	2.06	9.25	L	2.26	5.91	0.052	L
M	2.15	7.91	L	2.40	3.77	0.032	M
A	2.07	10.67	L	2.24	7.28	0.076	規格外
B	2.10	9.90	L	2.28	6.69	0.090	L
C	2.21	7.17	L	2.39	4.30	0.014	M

表-3 強度および耐久性試験の概要

試験	養生日数	試験方法
圧縮強度	28日	JIS A 1108による
乾燥収縮	7日	JIS A 1129-3による(20°C, 60% RHの環境で28日間定)
塩分浸漬	28日	JSCE-G 572による。浸漬1年後に、深さ10mmピッチで全塩化物イオン量を測定し、見かけの拡散係数を算出
凍結融解	28日	JIS A 1148(A法)によるただし、溶液に3%NaClを使用

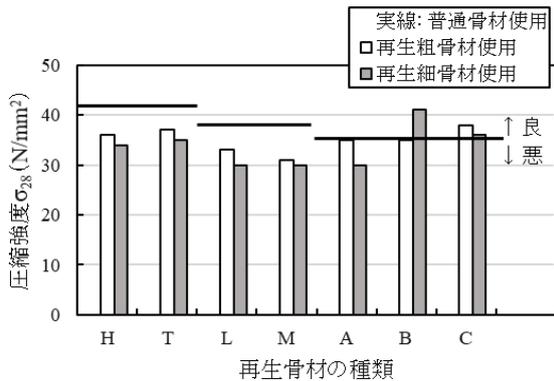


図-6 圧縮強度試験結果

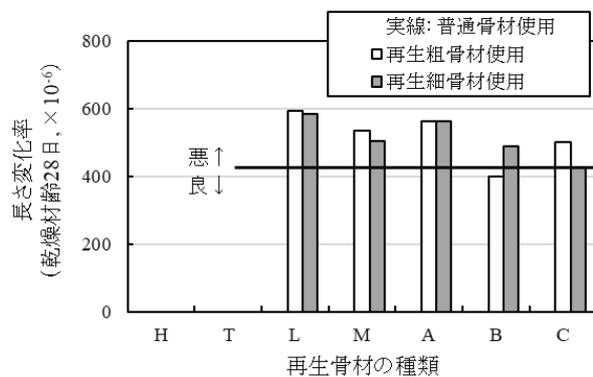


図-7 乾燥収縮試験結果から得られる長さ変化率

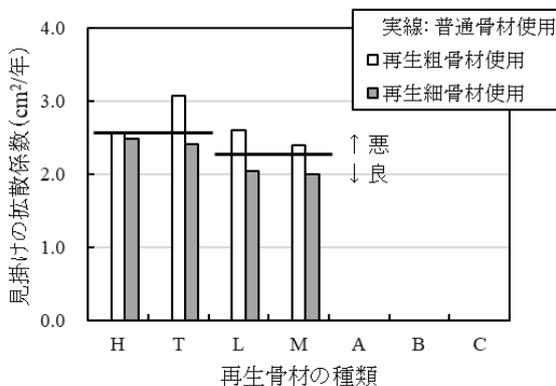


図-8 塩分浸漬試験から得られる見かけの拡散係数

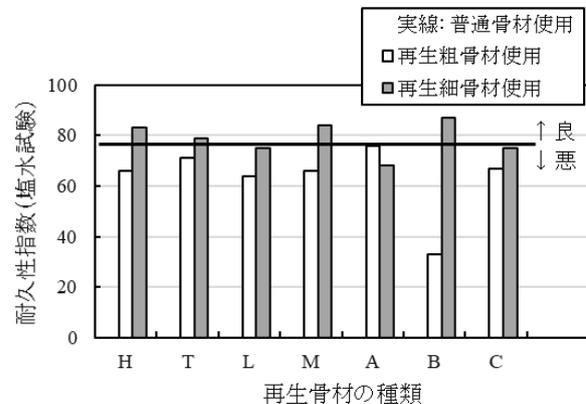


図-9 凍結融解試験結果から得られる耐久性指数

た。

強度試験および耐久性試験として表-3 に示す各種試験を実施した。試験結果を図-6~9 に示す。対比として普通骨材を使用した場合の試験結果は横線で示している（3 ヶ年それぞれで試験を実施している場合は異なる線分で示している）。

圧縮強度は、普通骨材コンクリートに比較して、再生骨材を使用することで、同程度かやや低下する傾向を示し、細骨材と粗骨材の影響度は同程度であった。

乾燥収縮試験から得られる長さ変化は、普通骨材コンクリートに比較して、再生骨材を使用することで、同程度かやや増加する傾向を示し、細骨材と粗骨材の影響度は同程度であった。

塩分浸透試験から得られる見かけの拡散係数は、普通コンクリートに比較して、再生粗骨材を使用すると僅かに大きく、再生細骨材を使用すると僅かに小さくなる傾向を示したが、試験精度を考えると同程度と考えられる。

凍結融解試験から得られる耐久性指数は、再生粗骨材を使用することで大きく低下する配合があったが、再生細骨材を使用した配合では低下は見られなかった。

以上のように、今回実施した強度試験と耐久性試験の範囲では、再生粗骨材と同じ原コンクリートから一連のプロセスで製造した再生細骨材の使用が、再生粗骨材の使用以上に不利となる傾向は確認できなかった。

4. まとめ

令和2年度の研究成果を以下に整理する。

- (1) 文献調査の結果として、圧縮強度は再生骨材の品質区分に応じて強度発現が頭打ちとなる場合があることを確認した。また、乾燥収縮は再生細骨材よりも再生粗骨材の影響が大きいことを確認した。
- (2) 再生粗骨材が含有する塩分量を測定する場合、外来塩の影響を受けにくい構造物では、測定用試料の必要量を低減できる可能性がある。
- (3) 再生細骨材の有効利用の可能性について検討した。その結果、今回実施した強度試験と耐久性試験の範囲では、再生細骨材の利用が、再生粗骨材の使用以上に不利となる傾向は確認できなかった。

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

- 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) 野々村佳哲、吉田行、島多昭典: 再生骨材を用いたコンクリートの強度・乾燥収縮・中性化に関する文献調査、寒地土木研究所月報、第814号、2021.2.

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）、井谷雅司、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2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について、室内においてアスファルトバインダ等の劣化・再生を複数回繰返し、その性状変化の把握を行うとともに、懸念される高温時ひび割れ抵抗性に関する評価方法の検討を行った。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。

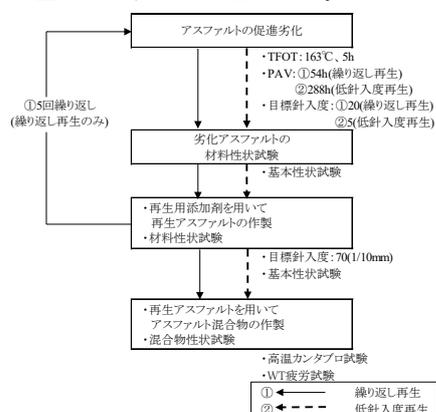


図-1 試験手順（100%再生）

(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、30%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」とおりである。R率30~80%の再生混合物（以下、r%再生とする）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。

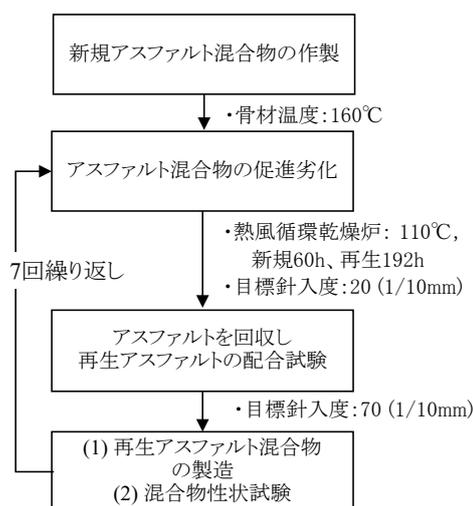


図-2 試験手順（30、60、80%再生）

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
	レジシン分	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
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-70-10 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-10307-1⁹⁾および既往研究⁶⁾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⁹⁾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⁹⁾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

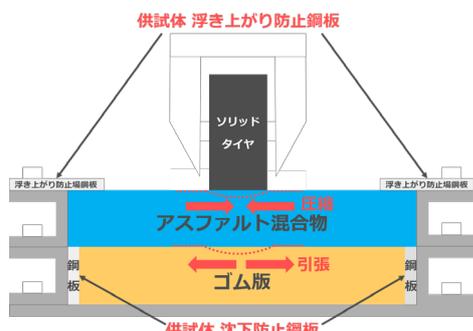


図-3 WT 疲労試験模式図

(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_{FB})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_{FB})を算出し N_{FB} 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 [℃]

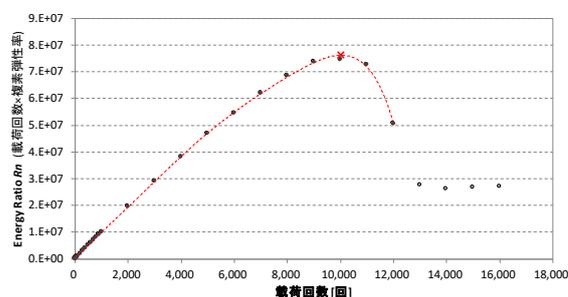


図-4 Energy ratio のデータ例

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き、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。

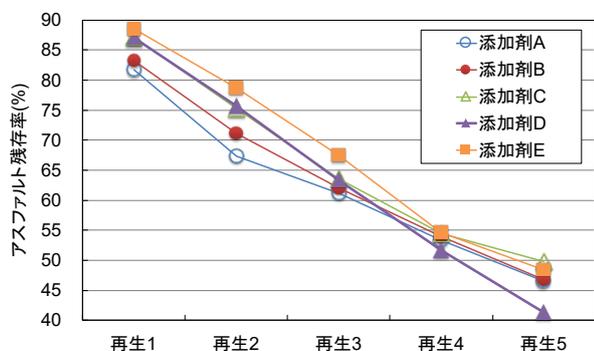


図-5 再生アスファルトのアスファルト残存率

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。

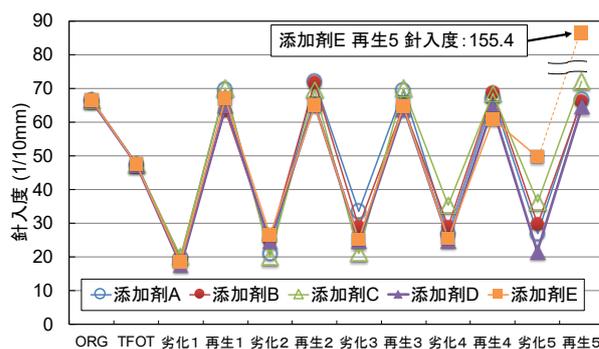


図-6 劣化・再生アスファルトの針入度

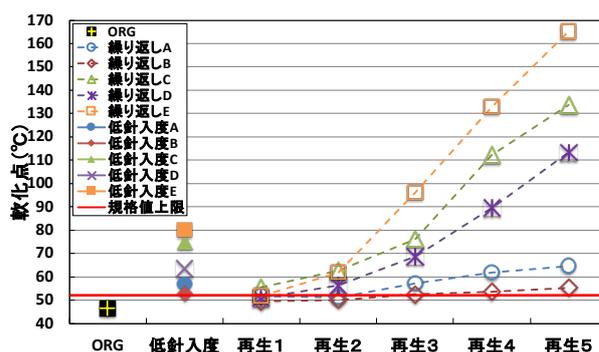


図-7 劣化・再生アスファルトの軟化点

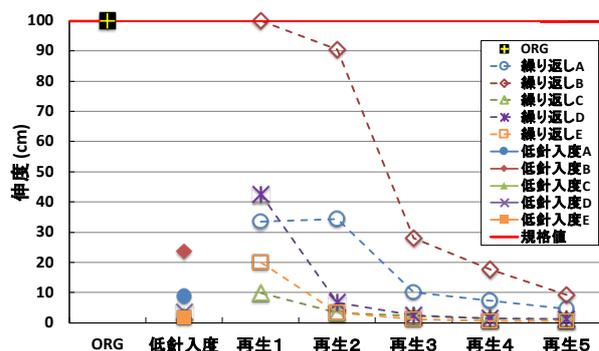


図-8 劣化・再生アスファルトの伸度

(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

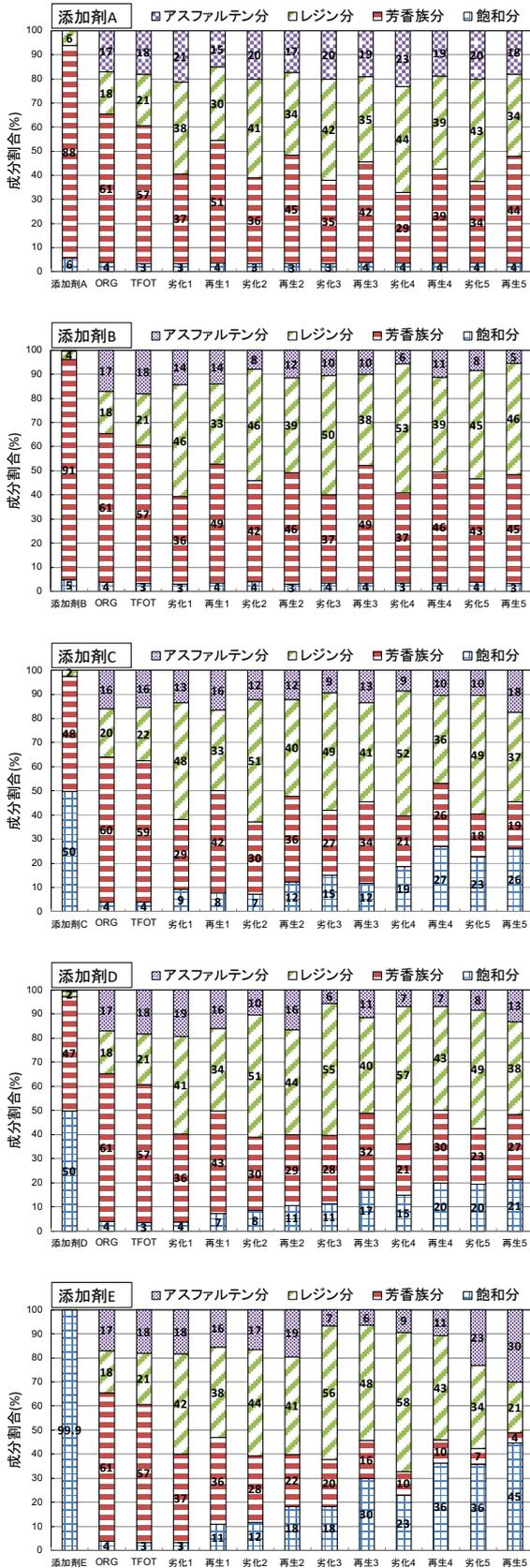


図-9 劣化・再生アスファルトの4成分組成

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、アスファレ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。

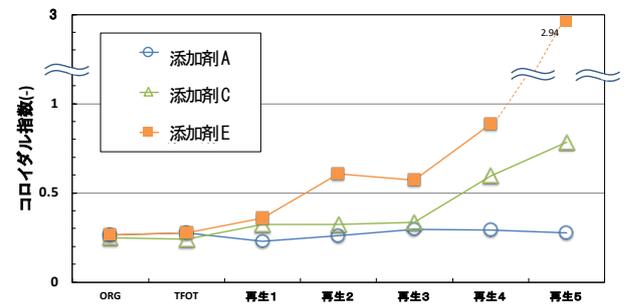


図-10 再生アスファルトのコロイダル指数

(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¹¹⁾、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。

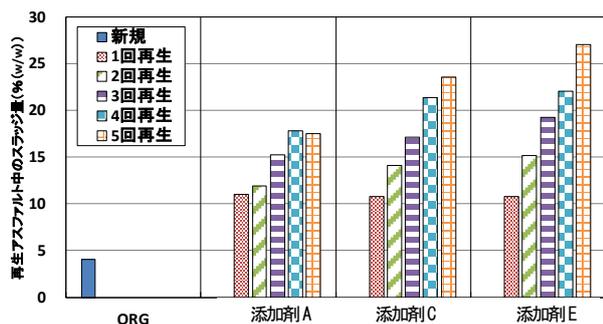


図-11 再生アスファルトのスラッジ量

(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。

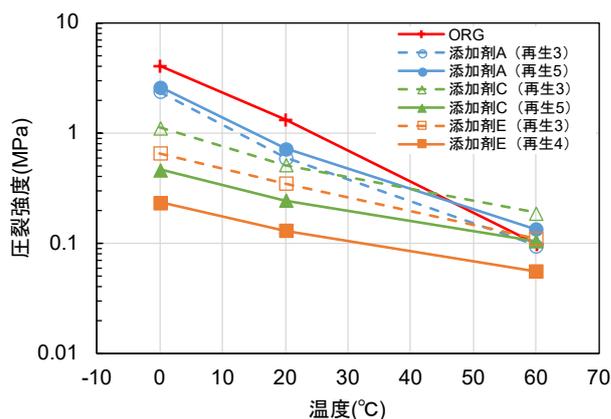


図-12 再生混合物A、C、Eにおける圧裂強度

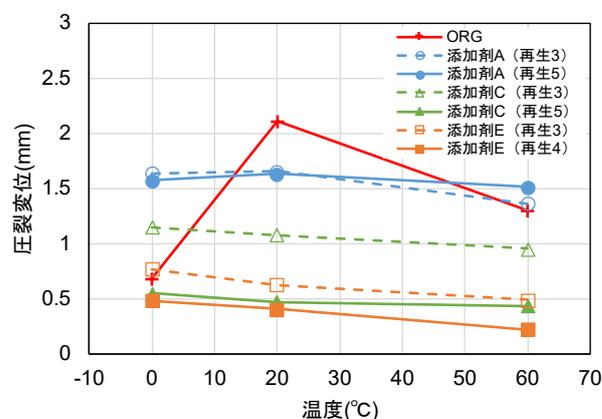


図-13 再生混合物A、C、Eにおける圧裂変位

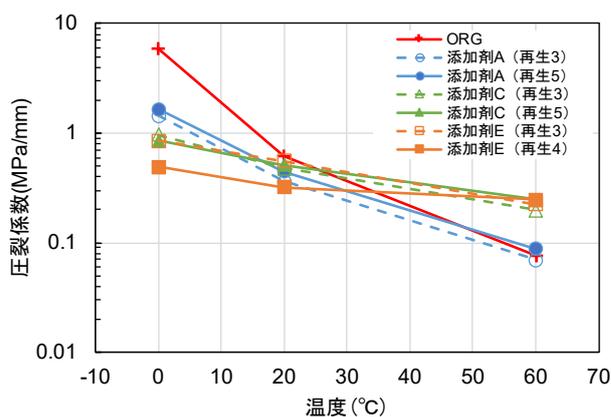


図-14 再生混合物A、C、Eにおける圧裂係数

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℃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℃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℃の圧裂係数も同程度となったものと考えられる。また、60℃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℃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℃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℃における圧裂強度を60℃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。

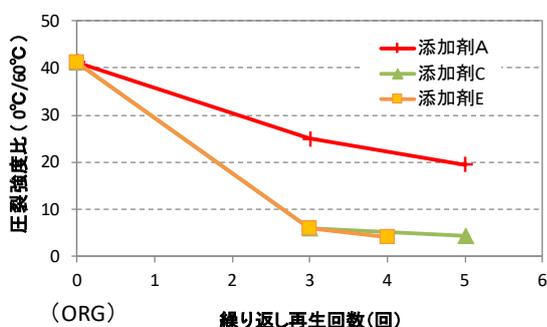


図-15 再生混合物 A, C, E における圧裂強度

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℃)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℃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℃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。

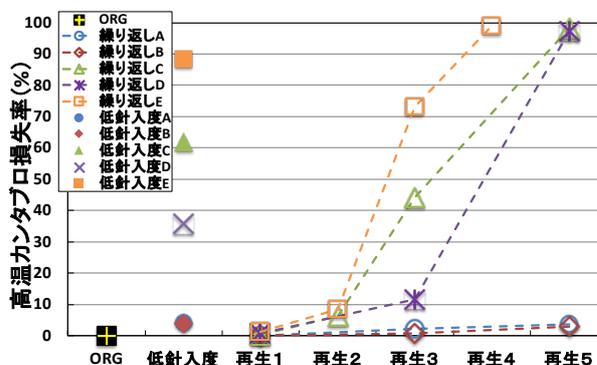


図-16 各再生混合物における高温カンタプロ損失率

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プ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。

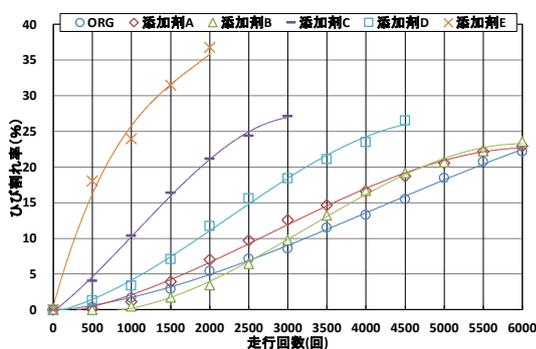


図-17 WT 疲労試験結果



写真-1 ひび割れ率 20%時の混合物の表面状態

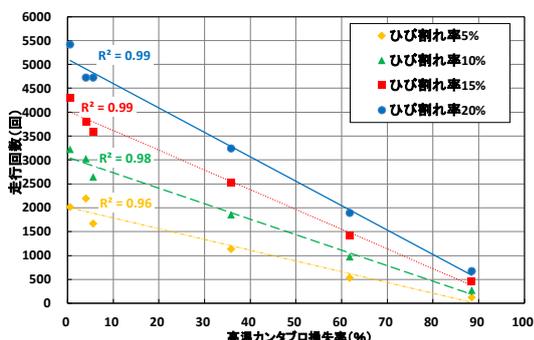


図-18 損失率と WT 疲労試験結果の相関関係

図-18 に高温カンタプロ試験結果と 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、高温カンタプロ試験は 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 30、60、80%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、曲げ疲労試験、小型曲げ試験および高温カンタプ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。横軸はORG (再生 0 回)、再生回数 (再生 n) を示している。なお、本論文中や凡例において、例えば添加剤 A により R 率 60%で 5 回再生した場合を、60%再生 5A として示している。

低温条件下 (0°C) の圧裂強度 (図-19 上) はいずれも線

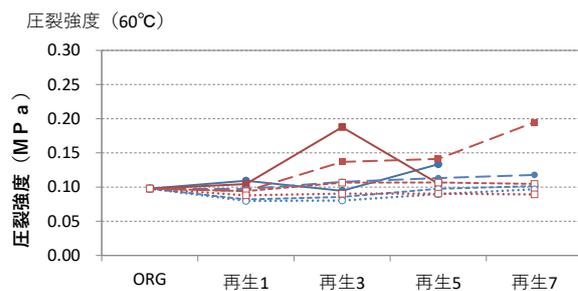
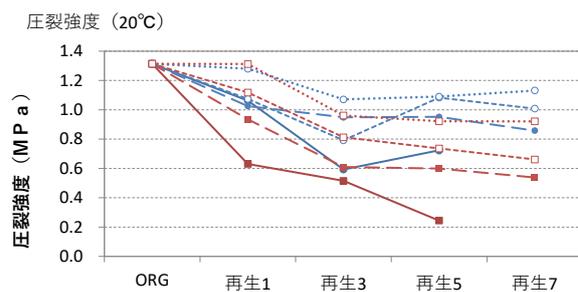
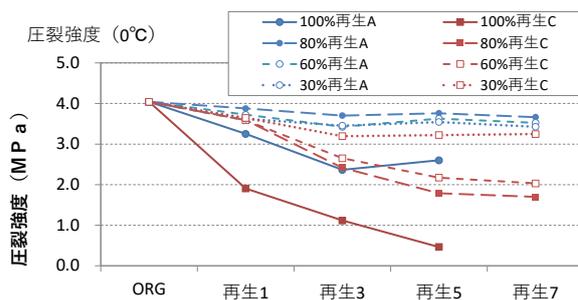


図-19 圧裂強度 (上 : 0°C, 中 : 20°C, 下 : 60°C)

り直し再生が進むにつれて減少傾向となった。その傾向は、R 率が低くなるほど緩やかになった。また、添加剤 C より添加剤 A のほうが緩やかであった。常温 (20°C) においても全体の差異が小さくなるものの、その傾向は同様となった。一方、高温 (60°C) では全体的に絶対値が小さく差異も小さいが、80%再生 3~7C および 100%再生 3C などでも多少大きな値を示した。試験法便覧によれば、60°Cにおける圧裂強度が高いほど耐流動性に優れているとあることから、再生回数が進むとわだち掘れ量については小さくなる可能性が示唆された。

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¹²⁾。図より、圧裂強度比はいずれのケースも繰り返し再生が進むにつれ減少した。その傾向は R 率が高くなるほど、添加剤 A より C のほうが顕著になった。一方、添加剤 A による 100%再生を除く再生混合物と 30%再生 C は ORG と差異が小さかった。

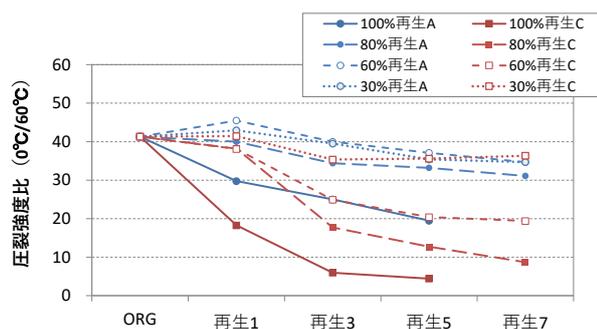


図-20 圧裂強度比

文献^{2), 14)}によれば、圧裂強度比が 20 程度まで低下すると多くの舗装でひび割れが発生しており、ひび割れ率は 2~20%が多く、最大では 70%程度発生した区間もあった。図-20 より、圧裂強度比 20 以下は添加剤 A では 100%再生 5、添加剤 C では 100%再生 1 以降、80%再生 3 以降、60%再生 7 となることから、添加剤は芳香族分が多い A より飽和分が多い C、R 率が高いほどひび割れ抵抗性の低下が懸念された。なお、文献^{2), 14)}では圧裂強度比 10 以下のデータは確認できなかったが、ひび割れ抵抗性はさらに低下すると推察された。

2) 圧裂係数

圧裂係数を図-21 に示す。低温条件下 (0°C) では、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、常温 (20°C)

では、変位がやや減少傾向になり圧裂強度も減少傾向であったことから、幅は大きいものの ORG とほぼ同等からやや減少傾向となった。これは、圧裂係数は 20°C では針入度と相関が高く、針入度 70 程度に再生された混合物ではこのように ORG と近い値になったものと推察された。

一方、高温 (60°C) では、変位が 100%再生 C は減少傾向になったほかほぼ横ばいとなり、圧裂係数は 100%再生 1C 以降および 80%再生 7C が上昇しそのほかは ORG と同等となった。これら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 と明らかに差異が生じたケースもあったことから、今後も各種試験結果との関係性を分析することとした。

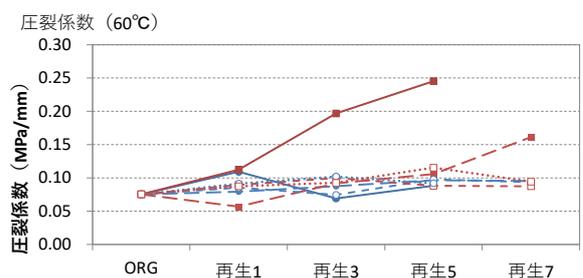
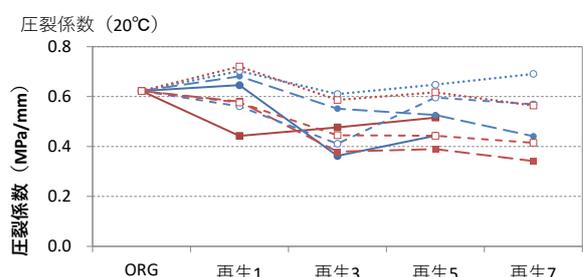
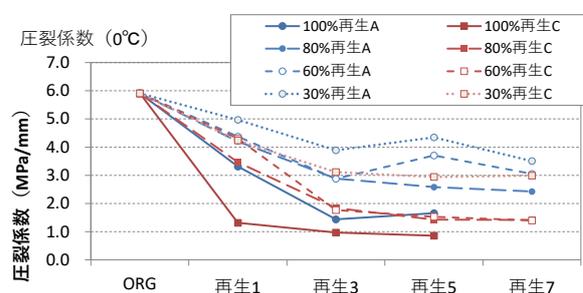


図-21 圧裂係数 (上: 0°C、中: 20°C、下: 60°C)

(2) 曲げ疲労試験

1) 破壊回数 (N_{FE})

N_{FE} の推移を図-22 に示す。縦軸の破壊回数は対数表示であるが、添加剤 A で再生されたすべての混合物および 30%再生 C は、再生回数が進んでも新規混合物 (ORG) とほ

ば同等であった。それに対し、添加剤Cを用いた再生混合物では、R率が高くなるほど、再生回数が進むほど、 N_{FE} は増加した。このことから、0°Cの環境下では、飽和分の多い添加剤CでR率が高いほど、疲労破壊抵抗性が高い結果となった。

なお、曲げ疲労試験には応力制御とひずみ制御があり、前者は複素弾性率が大きいものほど発生するひずみが小さく疲労寿命は長くなり、後者は複素弾性率が大きいものほど発生する応力が大きく寿命は短くなる¹⁵⁾ことが知られている。そこで、 N_{FE} と初期複素弾性率 E_{ini} (载荷1000回)の関係を図-23に整理した。前述したとおり負の関係となり、複素弾性率が大きいものほど発生する応力が大きく寿命は小さくなったことを裏付ける結果となった。

次に、この E_{ini} の推移を図-24に整理した。図より、 E_{ini} は、30%再生A以外で、再生回数が進むにつれて低下した。この傾向はR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60%再生7C、80%再生7CはORGに比べ40%程度以下となった。この低い複素弾性率の性状を有する混合物については、基層に比べて表層の複素弾性率が相対的に小さい場合に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¹⁵⁾ことが指摘されている。よって、複素弾性率の急激な低下や高温時(低い複素弾性率)におけるひび割れ抵抗性への影響に留意が必要である。

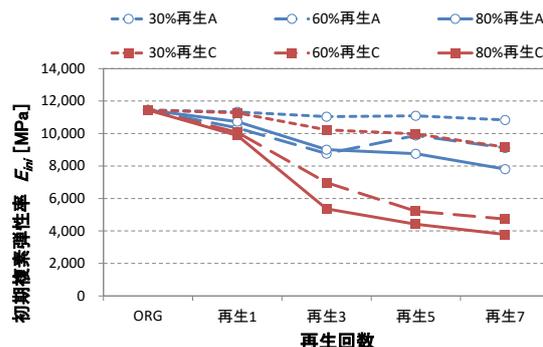


図-24 初期複素弾性率 E_{ini} の推移

2) 応力減少率

既往の研究¹⁶⁾では、破壊点前および後の応力減少率を求めることにより、微細ひび割れの発生や破断の進行状態を評価している。ここで、応力減少率とは、「载荷1サイクルあたりの応力の減少割合であり、破壊点を定める際にその前後で設定する接線の傾きから求められる」指標である。ただし、破壊点を定める際の接線は载荷回数データが対数目盛であるのに対して、本指標は対数目盛にする前の値から算出していることから、加工する前のデータ区間の傾きと同じになる。

図-25に破壊点前後の応力減少率を示す。破壊点前の応力減少率は、破壊点後が0から-1,200 (Pa/回)位の範囲となったのに対し、0から-150 (Pa/回)位の範囲となり、エネルギーの散逸が小さいことを示している。その中で再生混合物の応力減少率は、繰り返し再生が進むにつれて図では右下がりの傾向となり、添加剤による顕著な差はなかった。その一方、破壊点後では、添加剤Aによる再生混合物の応力減少率は多少の前後はあるもののORGと同等の値を示し、添加剤Cの場合はR率が高いほど、再生回数が多いほど右上がりの傾向となった。これは、添加剤Cを使用した再生混合物は、破壊点後はORGよりもひび割れの進行が緩やかとなると考えられた。この理由の一つとして、試験温度が0°Cであることから、新規アスファルトは脆化点以下、添加剤Cを用いた再生混合物は脆化点以上、添加剤Aを用いた混合物はORGと近い性状になったためと考えられた。

また、この破壊点後の応力減少率の推移は図-23に示した E_{ini} の傾向と逆であった。そこで、その関係を図-26に示すとともに、相関を算出した。その結果、決定係数は0.8138と高い相関が得られた。なお、破壊点前の決定係数は0.058となった。これより、今回の0°C・ひずみ制御の試験条件では、 E_{ini} が低い混合物は破断後のひび割れの進行も緩やかになる可能性があることが示された。

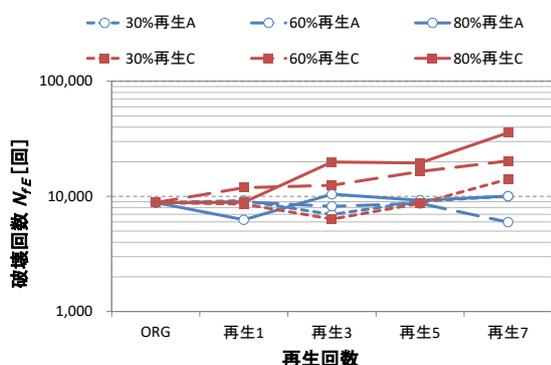


図-22 破壊回数 N_{FE} の推移

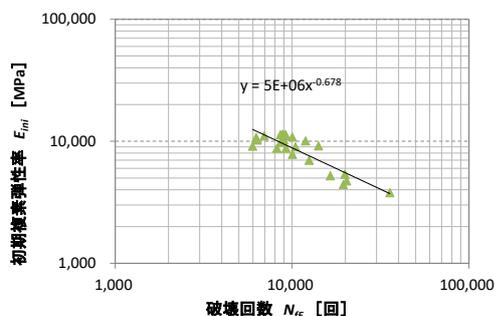


図-23 N_{FE} と E_{ini} の関係

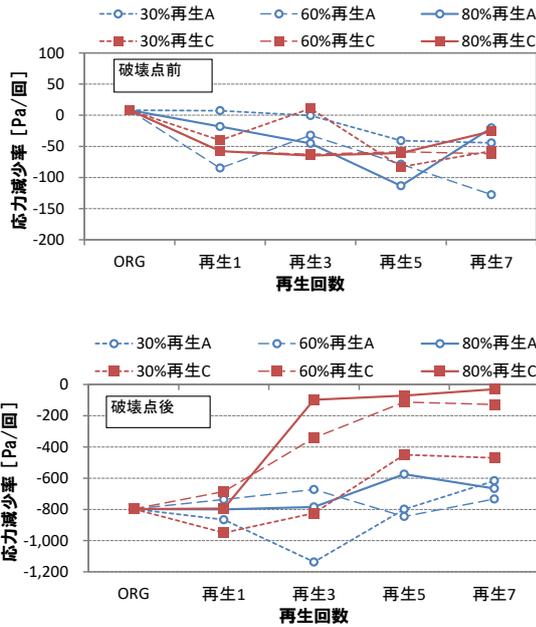


図-25 応力減少率（上：破壊点前、下：破壊点后）

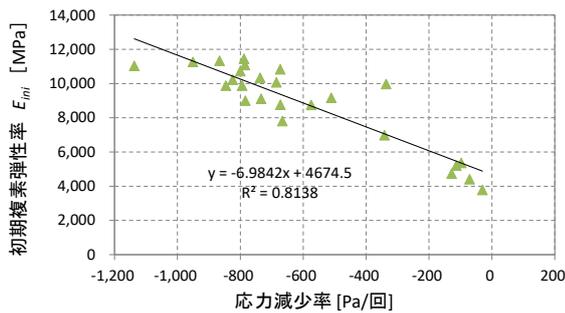


図-26 応力減少率（破壊点后）と初期複素弾性率

3) Energy ratioによる破壊回数 (N_{RR})

N_{RR} 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_{FE} の算出

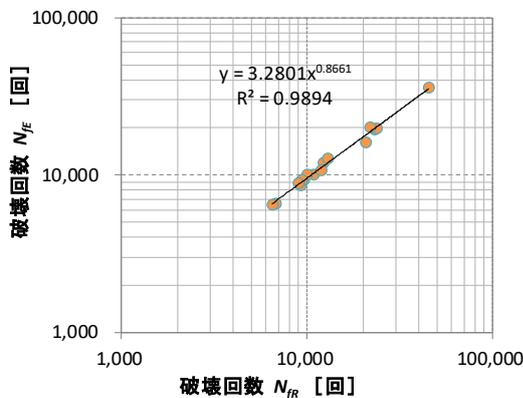


図-27 N_{FE} と N_{RR} の関係

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_{RR} 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_{RR} も活用可能と考えられる。

(3) 小型曲げ試験

低温時の脆性を把握するため小型曲げ試験を行い、破断時の曲げ強度およびひずみの測定結果を図-28 に示す。なお、試験データ量が多いことから ORG、再生 3 および 7 (100%再生は5) のみを示した。また、破断時ひずみの変曲点から算出した脆化点を図-29 に示す。これらより、繰り返し再生が進むにつれ脆化点が低温側に移行していくことが明らかになった。この傾向は R 率が高くなるほど、添加剤 A より C のほうが顕著になった。添加剤 A や R 率が低い、30%再生 1~5A、30%再生 1C および 60%再生 1A・1C は ORG と同等となった。

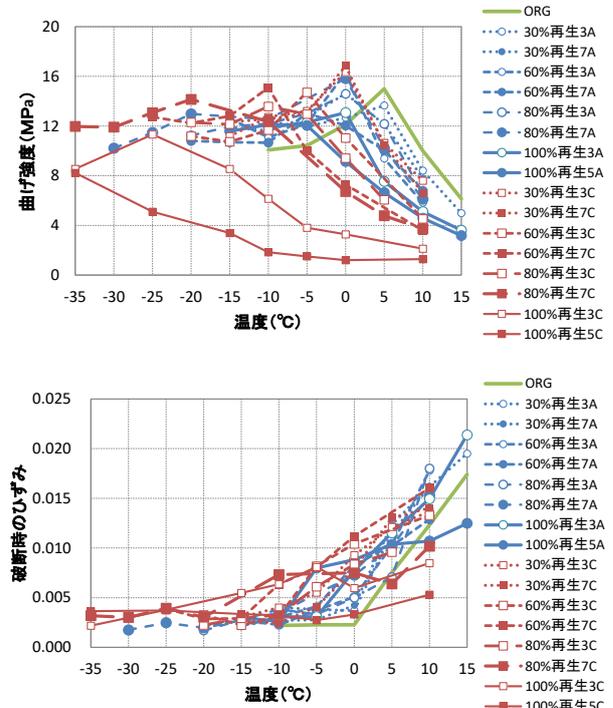


図-28 破断時の曲げ強度（上）とひずみ（下）

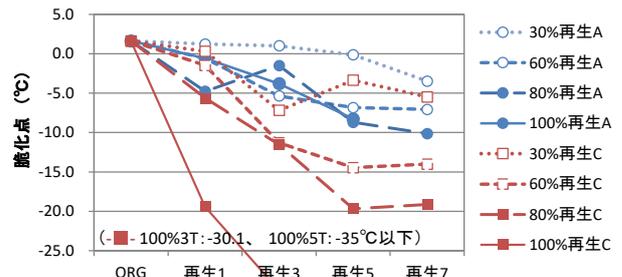


図-29 脆化点の推移

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

(4) 高温カンタブロ試験

1) 損失率

高温カンタブロ損失率を図-30 に示す。なお、後述するように、100%再生 C については損失率がほかの比べて高かったことから、再生 2 回についても試験を行った。その結果、添加剤 C により再生された R 率 60・80・100%の混合物および添加剤 A により再生された R 率 100%の混合物は、繰り返し再生が進むにつれて損失率が高くなった。特に、100%再生 3C は損失率 44%、同 5C は 98%となり、顕著な値となった。本試験は、舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験とされるホイールトラッキング疲労試験 (WT 疲労試験)¹²⁾ と高い相関が確認されている。したがって、飽和分の多い添加剤 C により再生された混合物で R 率が高いものは、実道においても高温時のひび割れ抵抗性が低下する可能性があり、芳香族分の多い添加剤で再生された混合物や R 率が低い混合物は高温時のひび割れ抵抗性の低下が抑えられる可能性があることが示唆された。

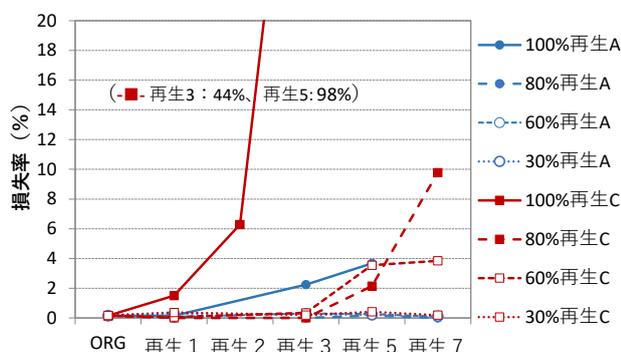


図-30 高温カンタブロ試験結果

2) 高温時ひび割れ抵抗性の評価法検討

圧裂試験で求められる圧裂強度比は、値が小さいとひび割れが発生しやすいとされている^{2), 14)}。また、高温カンタブロ試験も、WT 疲労試験と高い相関が確認され、高温時のひび割れ抵抗性の評価に用いることができる可能性がある⁶⁾。この両試験の関係性を整理し、その適用可能性について検討した。

関係性の整理については、高温カンタブロ損失率を目的

変数、0、20、60°Cの圧裂試験結果 (圧裂強度、変位、圧裂係数、圧裂強度比) を説明変数として累乗関数で近似式を算出し、その二乗平均平方根誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を求めた。その結果を表-10 に示す。

RMSE が最小になったのは圧裂強度比であり、両指標のプロットデータを図-31 に示す。圧裂強度比と高温カンタブロ損失率は関係性が高いことが明らかになった。なお、圧裂係数の試験結果において 0°Cおよび 60°Cの圧裂係数が ORG と明らかに差異が生じたケースがあったが、RMSE が圧裂強度比の次に低かったことから圧裂係数 (0°C、60°C) も高温カンタブロ損失率とも関係性あることが示唆された。

表-10 圧裂試験の各指標と高温カンタブロ損失率の二乗平均平方根誤差 (RMSE) (単位%)

圧裂試験の温度	圧裂強度	変位	圧裂係数	圧裂強度比
0°C	7.43	11.37	2.04	1.27
20°C	7.23	7.50	21.75	
60°C	18.18	8.08	2.17	

ここで、既往文献¹⁴⁾によれば、圧裂強度比が 20 程度に低下すると多くの舗装でひび割れが発生していた。図-31 では圧裂強度比 20 程度から損失率が上昇しはじめていることが確認することができる。図-20 において圧裂強度比 20 以下は添加剤 A では 100%再生 5 のみ、添加剤 C では 100%再生 1 以降、80%再生 3 以降、60%再生 7 となった。なお、圧裂強度比 20 の損失率は近似式によれば 1.14%である。また、図-31 では圧裂強度比 10 付近で損失率が顕著に上昇しているが、図-20 の圧裂強度比 10 以下は添加剤 C による 100%再生 3 以降、80%再生 7 であり、これらはひび割れがさらに高くなる可能性があると考えられた。このことから、高温時のひび割れ抵抗性は、繰り返し再生が進

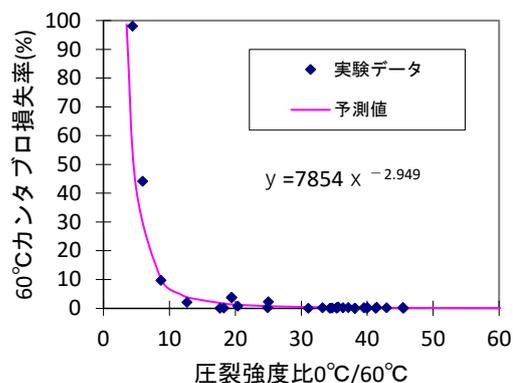


図-31 高温カンタブロ試験と圧裂強度比結果

むにつれて、添加剤の組成として芳香族分より飽和分が多く R 率が高いほうが低くなる可能性があることが明らかになった。さらに、これらは圧裂強度比や高温カンタプロ損失率により定量的に評価できる可能性もあることが確認できた。

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、高温でのひび割れ抵抗性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影響について、実現場において用いられている再生骨材を使用した検証等検討を進める予定である。

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、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-32）。

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骨材を用いて作製した再生混合物に対して、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。

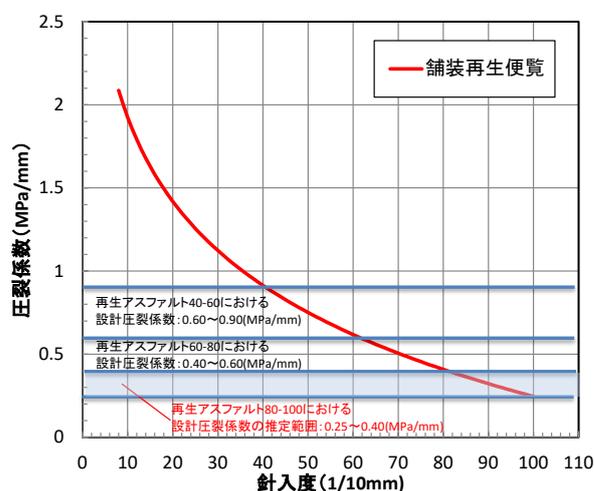


図-32 再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係

(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：混合物をバットに敷きならして 110°C の恒温乾燥炉にて所定の時間養生して模擬的に促進劣化させ作製した再生骨材を用いた再生混合物
- ②プラント骨材混合物：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、当研究所で各プラントにて使用されている再生用添加剤を用いて添加率を決定し、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 2 条件の再生混合物を図-33 の条件で作製し圧裂係数を計測した。結果を図-34 に示す。圧裂係数は 0.25~0.45 MPa/mm の範囲であり、図-32 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、再生骨材の旧 As 針入度が 20 (1/10mm) まで低下した材料を 3 サイクル再生利用する厳しい劣化履歴を受けた条件を除くと、圧裂係数はいずれもこの範囲に入る結果となった。

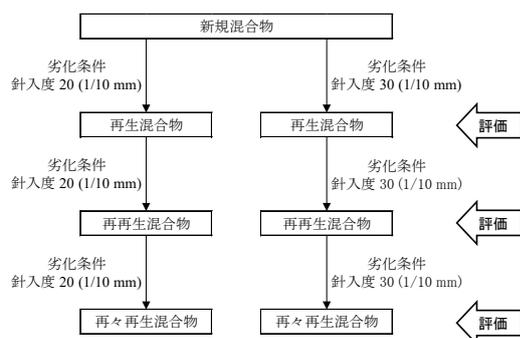


図-33 圧裂試験の評価対象

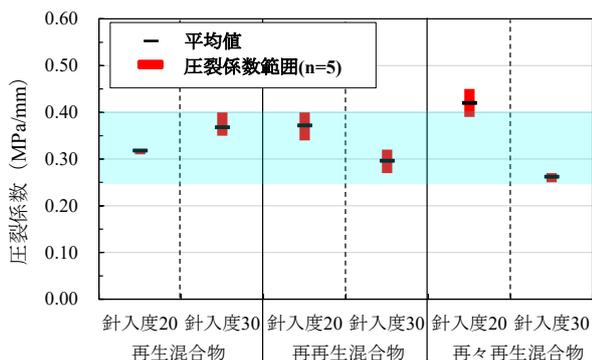


図-34 再生混合物等の圧裂係数範囲

(2) プラント骨材混合物

北海道内のアスファルトプラントより採取した再生骨材の性状を表-11 に、配合設計に使用した再生用添加剤の性状を表-12 に示す。再生骨材の旧アスファルトの針入度は 20 (1/10mm) 程度、圧裂係数は 1.70 MPa/mm を超える材料が多く、劣化が進んでいることが分かる。また、再

生用添加剤は全てのプラントで飽和分主体となっている。圧裂試験の結果を図-35 に示す。圧裂係数は 0.27~0.80 MPa/mm であり、0.25~0.40 MPa/mm の範囲内に収まらないものも見られる結果となった。

表-11 再生骨材の性状

採取箇所名	a	b	c	d	e	f	g	h
針入度 (1/10 mm)	20	18	19	21	22	23	17	22
圧裂係数 (Mpa/mm)	2.17	2.38	2.18	2.03	1.83	1.98	2.32	1.58

表-12 再生用添加剤の性状

採取箇所名	a	b	c	d	e	f	g	h
飽和分 (%)	80.6	81.2	79.5	79.0	79.5	80.7	79.5	80.8
芳香族 (%)	16.5	15.9	19.6	15.0	19.6	18.4	19.6	18.3
レジン分 (%)	2.9	2.0	0.8	4.6	0.8	0.6	0.8	0.5
アスファルテン (%)	0.0	0.0	0.1	0.8	0.1	0.3	0.1	0.4

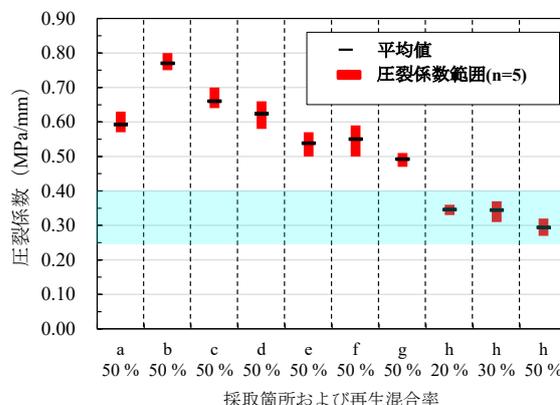


図-35 プラント骨材混合物の圧裂係数

(3) 再生骨材と再生混合物の圧裂係数の関係

プラント骨材混合物において、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た要因として、再生骨材の性状の影響が考えられることから、図-36 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。

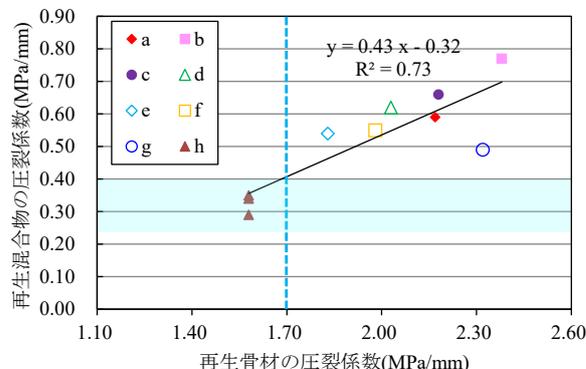


図-36 再生骨材と再生混合物の圧裂係数の関係 (飽和分主体の再生用添加剤)

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見られた。また、再生骨材の圧裂係数が規格値の 1.70 MPa/mm を超えると、針入度 90 (1/10mm) を目標に再生用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明らかとなった。

(4) 低品質骨材への活用に向けた検討

再生骨材の圧裂係数が規格 1.70 MPa/mm を上回った a、c、d、e、f、g の再生骨材を用いて、芳香族の割合の多い（飽和分 42.3%、芳香族分：53.4%、レジン分：3.7%、アスファルテン分：0.6%）の再生添加剤を用いて、再生 As の針入度を 80-100 (1/10 mm) の中央値である 90 (1/10mm) に調整して配合設計を行い再生混合物の圧裂係数を測定した。結果を図-37 に示す。

ほぼ全ての再生混合物において、飽和分主体の再生添加剤を用いた場合よりも圧裂係数は小さくなり、再生骨材の圧裂係数が高い劣化の進んだ材料ほど、再生添加剤の違いによる影響が大きく現れた。ただし、全ての再生混合物で 80-100 に該当する設計圧裂係数の範囲である 0.25~0.40 MPa/mm に入る再生混合物はなく、針入度規格 60-80(1/10 mm) のアスファルト（以下、60-80）の設計圧裂係数である 0.40~0.60 MPa/mm の範囲内となった。

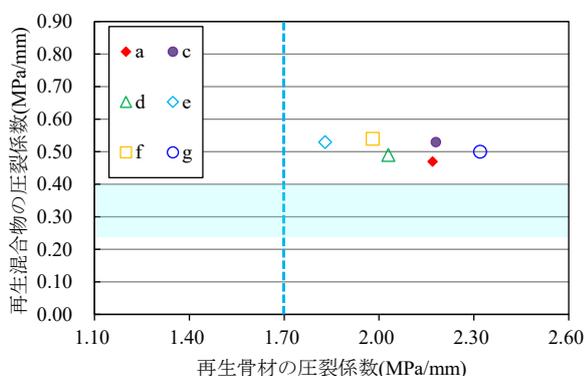


図-37 再生骨材と再生混合物の圧裂係数の関係
(芳香族の割合の多い再生用添加剤)

3.1.3 考察

図-32 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、プラント骨材混合物の範囲は 0.27~0.80 MPa/mm であり、推定範囲より大きな

値となるものが見られた。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することを明らかにした。さらに、再生混合物に使用する再生骨材の圧裂係数が 1.70 MPa/mm 以下の場合、再生混合物の圧裂係数が 0.25~0.40 MPa/mm の範囲に入ることを明らかにした。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、試料採取を行った再生骨材の旧 As の針入度は規格下限である 20 (1/10mm) 程度であり、圧裂係数は規格値を外れ 2.0 MPa/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、北海道地区における再生用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用添加剤はすべて飽和分主体の製品であることを確認しており、飽和分を主成分とする再生用添加剤よりも芳香族分の多い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たことから、今後、芳香族分を主成分とした再生用添加剤を用いた検討を行っていく予定である。

3.2 再生骨材の混合物層以外への有効利用法の検討

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 車道の凍上抑制層への適用性検討

(1) 材料特性の評価

凍上抑制層材料の検討に用いた再生骨材の性状を表-13 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-13 再生骨材の性状

試験項目		単位	As再生骨材 RC-40	規格値
最大粒径		mm	40	—
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	15以下
密度・吸水率試験	表乾密度	g/cm ³	2.369	—
	総乾密度	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℃)	%	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

(2) 凍上抑制層としての支持力性能の評価

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、20 cm 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ROMETA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-13 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-38 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。

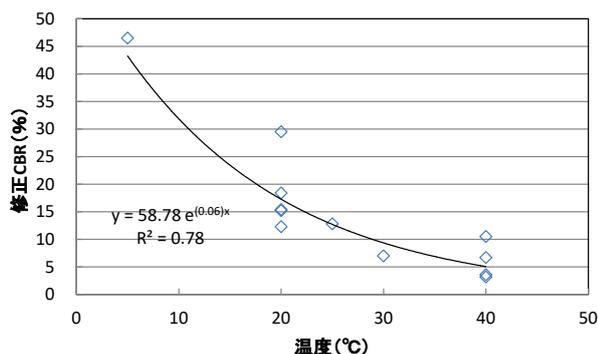


図-38 修正 CBR と温度の関係

2) DCP 試験

表-13 に示した材料を層厚 30 cm 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-39 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。

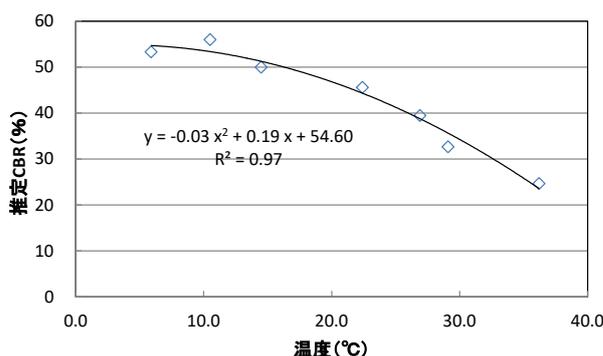


図-39 推定 CBR と温度の関係

(3) 舗装内温度が支持力低下へ与える影響評価

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-40、41 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。

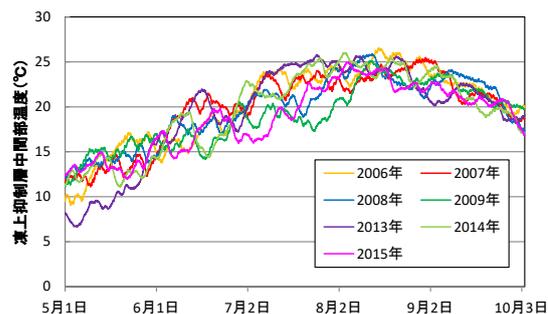


図-40 R238 稚内の凍上抑制層温度

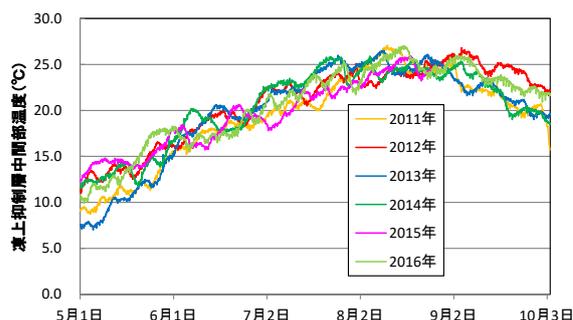


図-41 R231 留萌の凍上抑制層温度

再生骨材は図-38 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。

(4) FWD 試験による供用性状の評価

表-13 に示した再生骨材と切込砕石 80 mm 級を凍上抑制層材料として用いた試験施工を行い、図-42 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-43 に示す。再生骨材は切込碎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碎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、再生骨材と切込碎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。



図-42 試験施工箇所の断面

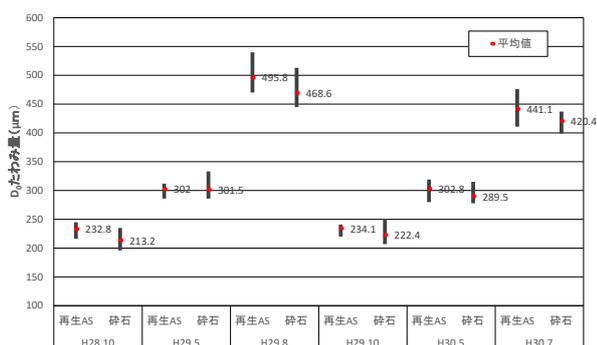


図-43 FWDによる D_0 たわみ量

(5) 凍上抑制層への適用性検討まとめ

これまでの検討結果を取りまとめ、北海道北部地域での適用に問題がないことを確認した。これらの結果は、北海道開発局の道路事業へ反映される予定である。

3.2.2 歩道路盤への適用性検討

(1) 試験施工の概要

再生骨材の歩道路盤材への適用性を検証するため、試験施工を実施している。試験施工箇所は、北海道北部の国道40号豊富町上サロベツ地区(以下、「R40豊富」と称する)、国道40号幌延町新興地区(以下、「R40幌延」と称する)の2箇所の実道歩道箇所、及び苫小牧にある試験道路構内に設置した試験歩道工区(以下、「苫小牧寒地試験道路」と称する)の3箇所にて効果の検証を行っている。これら

の各試験箇所では、再生骨材(RC-40 又は RC-13)を路盤に用いた工区と一般に使用される切込碎石 40 mm 級を用いた比較工区を設置し、強度特性、路面性状、内部温度の測定などを行い適用性の検証を行っている。各試験施工箇所の詳細について表-14 に示す。

表-14 試験施工工区の概要と試験項目

箇所	R40豊富		R40幌延		苫小牧 寒地試験道路	
	As再生骨材	切込碎石	As再生骨材	切込碎石	As再生骨材	切込碎石
延長[m]	140	110	100	100	18	18
舗装構成	歩道用細粒度アスコン t=3cm					
	RC-40[As] C-40		RC-40[As] C-40		RC-13[As] C-40	
強度特性	t=27cm					
	DCP試験		○		○	
	小型FWD試験		○		○(2020より実施)	
路面性状	FWD試験		-		-	
	横断凹凸(MRP)		○		-	
内部温度(熱対)	凍上量(測量)		-		-	
	○		○		○	
施工履歴	2017.10: 路盤・表層施工		2018.10: 路盤施工		2018.7: 路盤施工	
	2020.10: 表層施工		2020.10: 表層施工		2018.7: 表層施工	
					2019.4: 表層打換え 2020.11: 表層打換え	
備考	・拡幅改良区間 ・供用3年経過		・新設道路(未共用) ・路盤工事の2年後に表層舗設 ・高盛土区間		・地震等により表層を2度打換え	

※RC-40[As]: As再生骨材40mm級を示す。
 ※RC-13[As]: As再生骨材13mm級を示す。
 ※C-40: 切込碎石40mm級を示す。

(2) 歩道路盤材料の検討に用いた再生骨材の初期性状

歩道路盤材料の検討に用いた再生骨材の性状を表-15 に示す。検討に用いた再生骨材は、路盤材料として

表-15 路盤材料の品質

項目	単位	路盤材料(R40豊富)		
		As再生骨材	切込碎石	
最大粒径	mm	RC-40	C-40	
単位容積質量試験	kg/m ³	1.462	1.826	
密度および吸水率試験	絶対密度	g/cm ³	2.376	2.590
	表乾燥密度	g/cm ³	2.447	2.638
	見掛密度	g/cm ³	-	2.722
	吸水率	%	3.02	3.46
洗い試験	全量に対する0.075mm通過率	%	2.1	2.72
	4.75mm以下に対する0.075mm通過率	%	5.71	10.5
修正CBR試験	修正CBR試験(20℃)	%	15.5	140.0
	最適含水比	%	8.4	6.3
凍上試験	最大乾燥密度	g/cm ³	2.000	2.162
	道路土工要領	-	非凍上性	非凍上性

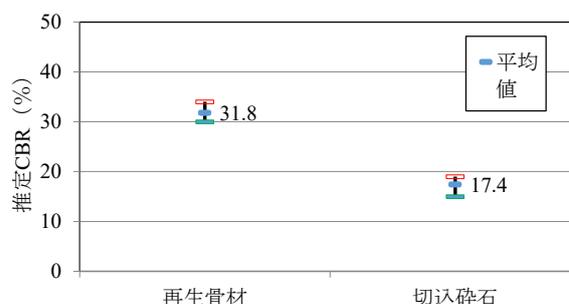


図-44 DCP 試験結果

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。20°Cにおける修正CBR試験値は15.5%であった。DCP試験により支持力評価を行なった結果を図-44に示す。再生骨材の推定CBRの平均値は31.8%を示し十分な支持力を有していることを確認した。

(3) 歩道路盤材料の供用性状の評価

1) アスファルト再生路盤の支持力特性について

① DCP試験による推定CBR値の評価

R40 幌延と苫小牧寒地試験道路の試験歩道の再生骨材工区の施工直後と2年経過後の推定CBR (DCP試験結果より換算) の変化を図-45に示す。施工直後は、深さ方向にほぼ均等な支持力分布となっており、均質に締固まっていることがわかる。供用2年後には、推定CBR値の増加が見られ、特に路盤層の上部において推定CBR値の増加の傾向が見られる。路盤の表面付近は、特に夏場に熱の影響を受け、再生骨材に含まれるアスファルト分による再固化が起きていることなどが推察される。

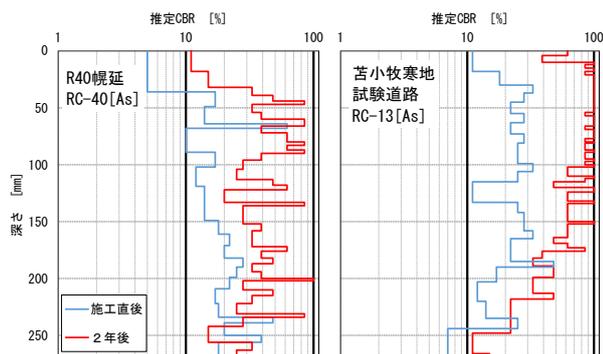


図-45 アスファルト再生路盤の推定CBRの2年間の変化
(左：R40幌延、右：苫小牧寒地試験道路)

② 小型FWDによる路盤層の平均弾性係数の評価

アスファルト再生路盤の支持力特性を確認するため舗装表面から小型FWD試験を実施した。さらに小型FWDで測定したたわみ量を用いて逆解析を行い、弾性係数を算出した。なお、逆解析には静的逆解析ソフト「BALM」を用いた。また、解析時の初期条件は、予備解析により求めた表層、路床の弾性係数の平均値を固定条件 (表層：3,000 MPa、路床：70 MPa) とし、路盤の弾性係数の変化に着眼して解析を行った。また、解析に使用したたわみ量は、5月から11月までの間で7月、8月を排除した比較的温度条件が一定となる時期の結果を対象とした。

図-46に小型FWDのたわみ量の逆解析より求めたR40豊

富の路盤層の平均弾性係数を示す。アスファルト再生路盤の弾性係数は、300 MPa程度と切込砕石路盤に比べ高めに推移しており、供用に伴う弾性係数の低下も見られず、支持力特性に問題ないと言える。一方、切込砕石路盤では、供用に伴い弾性係数の低下が確認された。この原因は切込砕石路盤では、舗装表面の横断方向の不陸が確認されており、凍上による支持力低下が発生している可能性が示唆される。

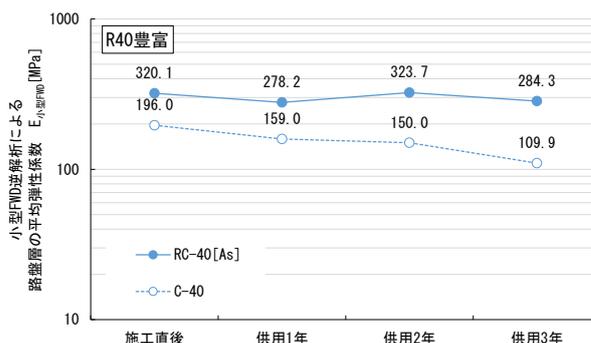


図-46 路盤層の平均弾性係数の推移

2) 路面の横断形状測定の評価

MRP (Multi Road Profiler) による路面の横断方向のプロファイル測定を行い凍上による路面変状の有無を確認した。R40 豊富のアスファルト再生路盤および切込砕石路盤の供用後3年間の横断形状を図-47に示す。施工後1冬経過後の2018年6月、2冬経過後の2019年10月および3冬経過後の2020年10月に計測を行ったが、アスファルト再生路盤では、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。一方、切込砕石路盤は、凍上の影響と思われる路面の上昇及び不均一な不陸が発生していることを確認した。現地においてはいずれの工区も、舗装表面にひび割れは発生していないが、長期的には、再生骨材の工区がひび割れに対して有利に働くも

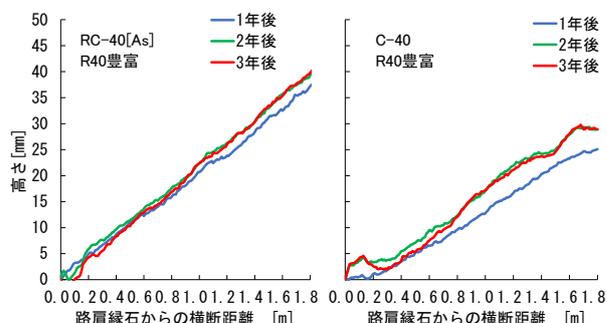


図-47 路盤層の違いによる横断形状の変化
(左：再生骨材、右：切込砕石)

のと推察される。また、アスファルト再生路盤は、夏期の熱の影響により含有アスファルト分の軟化に伴う沈下が懸念されたが、計測結果からは沈下は確認されていない。

3) アスファルト再生路盤の表面付近の固化について

写真-2 は苫小牧寒地試験道路において、舗設1年後に表層をバックホウで撤去した際の撤去塊の状況である。アスファルト再生路盤材が10cm程度の厚さで固化し、表層舗装と一体化していることが観察された。これは、DCP試験において表面付近の推定CBR値が時間経過とともに上昇することと合致しており、時間経過に伴いアスファルト再生路盤の強度増加、表層との一体化が発生することを目視でも確認できた。ただし、苫小牧寒地試験道路のアスファルト再生路盤は最大粒径13mmの再生骨材を使用しており、最大粒径40mmの再生骨材を使用したR40幌延、R40豊富については、今後、確認が必要である。



写真-2 表層に付着した固化したアスファルト再生路盤
(舗設1年後)

4) アスファルト再生路盤によるひび割れ抑制効果及び防草効果について

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=3cm)、路盤および凍上抑制層 (t=27cm) 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-3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-3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。

今回の検討結果から、アスファルト再生路盤は切込砕石路盤に比べて、凍上による不陸が発生しにくいこと、時間

経過に伴いアスファルト再生路盤の強度増加がみられ、表層との一体化も確認されたことなどから、ひび割れに対して有利に働くであろう結果が得られており、雑草の繁殖を抑えられる可能性が推察される。



写真-3 歩道の凍上ひび割れおよび低温ひび割れ

(4) 歩道路盤への適用性検討まとめ

再生骨材の歩道路盤への適用性について得られた結果を以下にまとめる。

- 1) DCP試験による支持力評価より、アスファルト再生路盤は十分な支持力を有しており、供用とともに推定CBR値が上昇する傾向を確認した。
- 2) 小型FWD試験による支持力評価より、アスファルト再生路盤は切込砕石よりも高い弾性係数を有しており、供用に伴い値が低下しにくい傾向を確認した。
- 3) MRPによる横断プロファイル測定の結果より、アスファルト再生路盤は、凍上に起因する不陸が発生していないことを、また目視調査より、路面にひび割れが生じていないことを確認した。

これらの結果より、再生骨材を歩道路盤材に利用することによる歩道舗装の耐久性の向上効果などが期待されるとともに、ひび割れ抑制に伴う防草効果などが期待できる可能性が示唆された。

3.2.3 再生骨材の混合物層以外への有効利用法のまとめ

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検討していく。

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・再生を複数回繰り返して、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) 100%再生における圧裂試験の結果、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で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) 100%再生における高温カンタブロ試験の結果、飽和分が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) 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が確認された。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。
- 8) 繰返し劣化・再生された混合物の曲げ疲労試験の結果、曲げ疲労試験では、飽和分が多い添加剤 C を用いた再生混合物で、R 率が高くなるほど、再生回数が進むほど N_{RE} は増加したことから、試験温度 0°C において疲労破壊抵抗性が高い結果となった。本試験条件はひずみ制御であり、複素弾性率が小さいものほど発生する応力が小さく寿命が長くなったことが考えられた。
- 9) 繰返し劣化・再生された混合物試験の結果、微細ひび割れの発生や破断の進行状態を評価する応力減少率は、破壊点前の値は添加剤による顕著な差はなかった。その一方、破壊点後では、添加剤 A による再生混合物の応力減少率は ORG と同等の値を示したのに対し、添加剤 C の場合は R 率が高いほど、再生回数が多いほど絶対値は小さくなった。このことから、後者は ORG よりもひび割れの進行が緩やかとなると考えられた。理由の一つとして、試験温度の 0°C は、ORG の脆化点以下、添加剤 C を用いた再生混合物の脆化点以上、添加剤 A を用いた再生混合物の脆化点は ORG に近い値であったためと考えられた。
- 10) 繰返し劣化・再生された混合物の小型曲げ試験の結果、繰返し再生が進むにつれ脆化点が低温側に移行していき、添加剤 A より C を用いて R 率が高いほど、再生回数が進むほど、より低温時のたわみ追従性を有する結果となった。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、常温や高温でのひび割れ抵抗性の低下が懸念された。
- 11) 繰返し劣化・再生された混合物の高温カンタブロ試験の結果、飽和分が多い添加剤 C で再生された混合物で R 率が高いものは損失率が高くなり、高温時においてひび割れ抵抗性が低下する可能性があることがわかった。さらに、圧裂強度比との回帰式を算出した結果、RMSE が低く、関係性が高いことがわかった。
- 12) 繰返し劣化・再生された混合物試験の結果、既往文献においてひび割れが多く発生したとされる圧裂強度比 20 程度以下となるのは、添加剤 A では 100%再生 5、添加剤 C では 100%再生 1 以降、80%再生 3 以降、60%再生 7 であった。高温カンタブロ試験結果からも損失率が圧裂強度比 20 から上昇しはじめ、圧裂強度比 10 付近でさ

らに上昇した。このことから、高温時のひび割れ抵抗性は、添加剤の組成として芳香族分より飽和分が多く、R率が高いほうが低くなる可能性があることが明らかになった。また、これらは圧裂強度比や高温カンタプロ損失率により定量的に評価できる可能性もあることが確認できた。

- 13) 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。
- 14) 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。
- 15) 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。また、歩道舗装の耐久性の向上効果などが期待されるとともに、ひび割れ抑制に伴う防草効果などが期待できる可能性が示唆された。

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。

- 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.
- 14) 建設省関東技術事務所:昭和 56 年度試験道路における試験調査報告書、建設省、1982.
- 15) 丸山暉彦、中村健、雑賀義夫:アスファルト混合物の疲労特性、アスファルト、Vol. 44 No. 208、pp. 9-15、2001.
- 16) 高橋修、平澤佑太:品質基準を下回る再生骨材を使用した再生アスコンの性能評価に関する一検討、土木学会論文集 E1、舗装工学論文集第 23 巻、pp. I_71-I_77、2018.

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.
- 5) ISO 10307-1: Petroleum products -- Total sediment in residual fuel oils -- Part 1: Determination by hot filtration, 2009
- 6) 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.
- 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) 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.
- 9) 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

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2年度は、再生中温化アスファルト混合物の性状に対する締固め度や劣化の影響を検討した。その結果、圧裂強度や圧裂係数は締固め度が低くなるにしたがって、これらの値が下がることが確認された。一方、高温カンタプロ損失率は、劣化前では損失率は1%前後でばらついており、締固め度による一定の変化は見られなかったが、劣化後には締固め度の低下に伴い損失率が増加する傾向が顕著であった。なお、これらの性状変化の傾向に対して、中温化技術の種類や再生用添加剤の組成の影響は比較的小さかった。また、屋外暴露1年における性状変化についても、再生用添加剤の違いによる影響は小さかった。

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2年度は、再生中温化アスファルト混合物の性状に対する締固め度や劣化の影響を検討した。

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。

表-1 アンケートの集計結果

地区	実施工場数	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	発泡調整系	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

アスファルトフェーム対策だけでなく、こうした問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荷重平均 (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)の発生量との関連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。

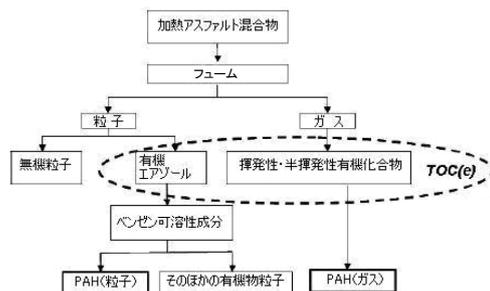


図-1 アスファルト混合物から発生する物質

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 (2 μ m 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 アスファルトフェーム測定系の様子

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ェ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、アスファルトフェ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ェ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 アスファルトフェ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

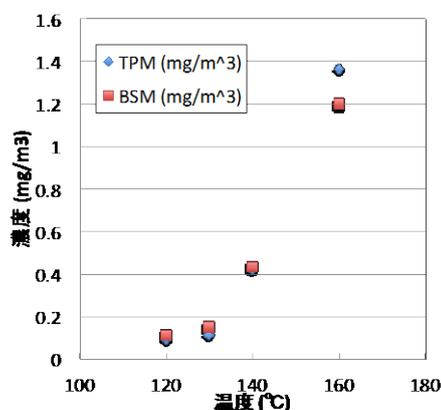


図-2 TPM および BSM 濃度

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ェーム発生量の検証

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

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 旧アスファルト比 (%)	添加剤A	18.6	
	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。

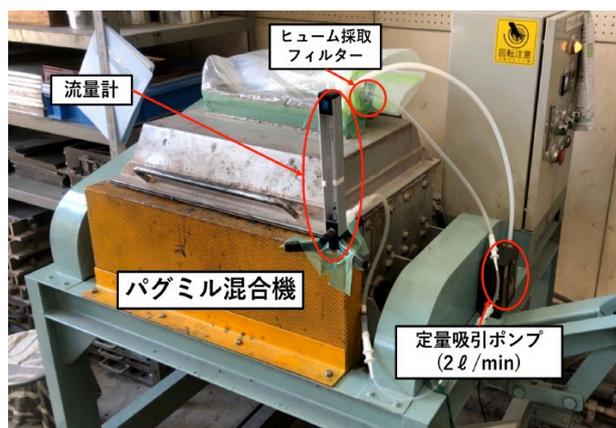


写真-2 アスファルトフェウムの採取状況

4.2.3 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 旧アスファルト比 (%)	添加剤A	18.6	
	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	
採取フィルター	種類	メンブレンフィルター PTFEサポート	
	細孔 (μm)	1.0	
	直径 (mm)	37.0	

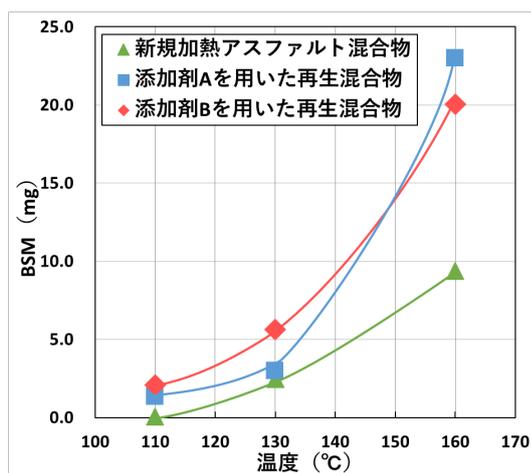


図-3 各混合物から採取したBSM量

4.3 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。

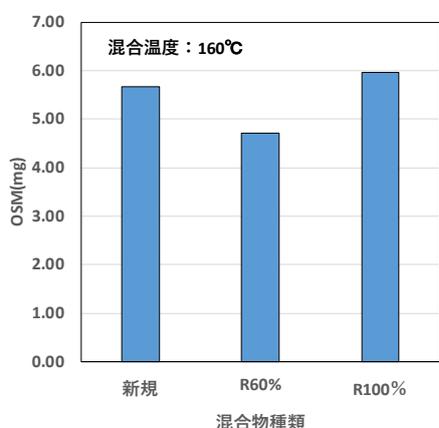


図-4 再生アスファルト混合物からのアスファルトフェーム量

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n3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。

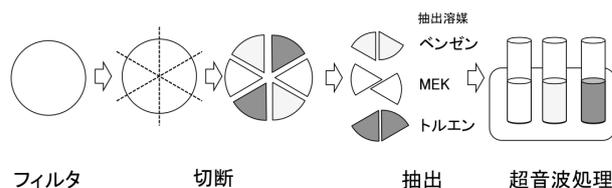


図-5 抽出手順

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。

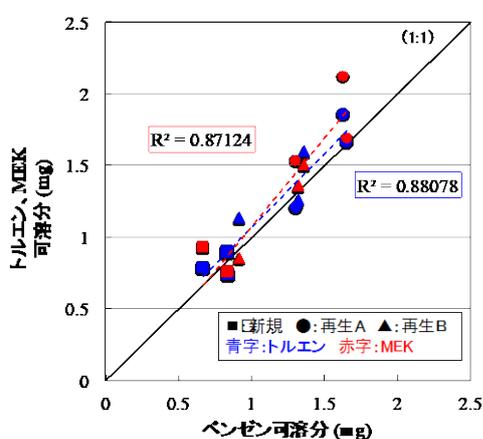


図-6 有機溶剤可溶分の相関

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、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℃、150℃および135℃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-7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。

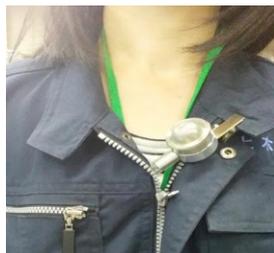


写真-3 作業員用フィルタ



写真-4 作業場近傍の
フィルタ設置状況

表-7 作業概要

対象	内容	フィルタ種類
作業員	作業員A Aa, 添加剤投入 MS作製 等	PIFE/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/PIFE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	

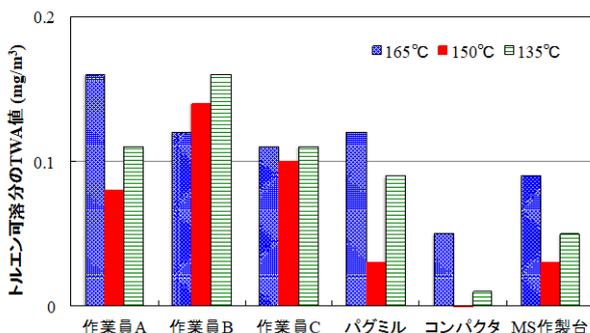


図-7 トルエン可溶分のTWA値

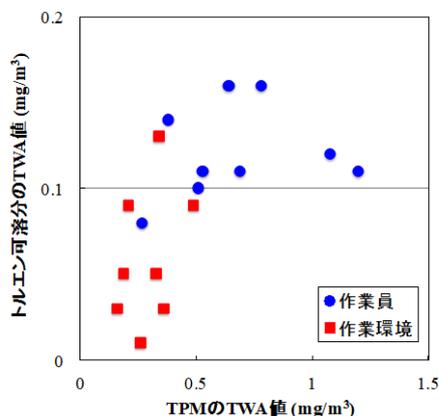


図-8 トルエン可溶分のTWA値

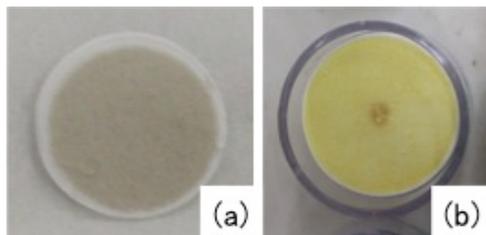


図-9 フィルタの様子

(a)作業員B (b)4章の試験で採取されたフィルタ

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ブロ試験を実施し、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~G)である。ただし、供試体Bはアスファルトに中温化剤をブレミックスしたものを用いており、供試体Gにはフォームドアスファルトの他に施工性を改善するための特殊添加剤を加えたものを使用した。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

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
供試体F		-	20	68	5.7	2.58	芳香族系	23.1	100.0	100.1
供試体G	フォームD 特殊添加剤	2.0	24	70	5.7	2.61	飽和分系	4.9	100.7	99.7

裂試験および高温度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(B006)に準拠し、試験温度 0℃、20℃および 60℃で実施した。一方、高温カンタプロ試験は、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。

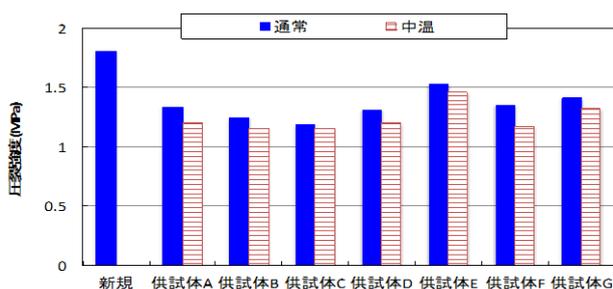


図-10 圧裂強度

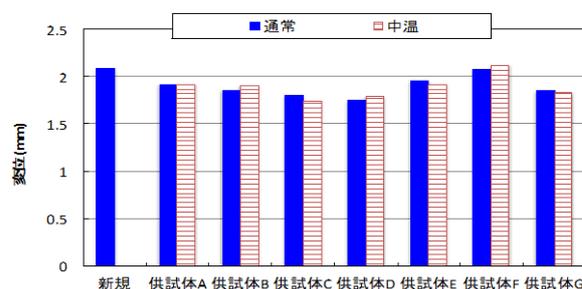


図-11 圧裂変位

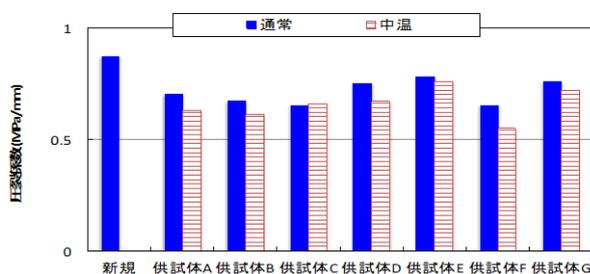


図-12 圧裂係数

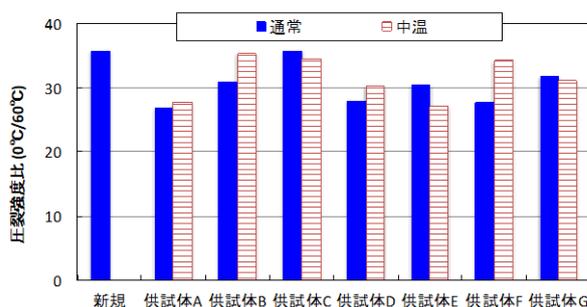


図-13 圧裂強度比(0℃/60℃)

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。

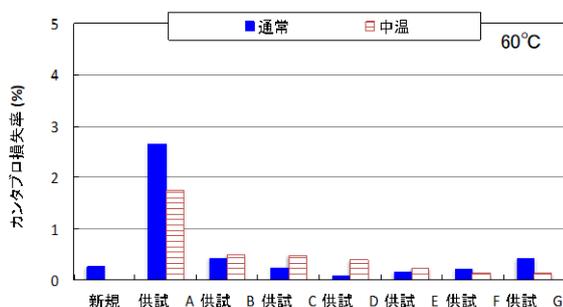


図-14 高温カンタプロ損失率

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¹⁾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。

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

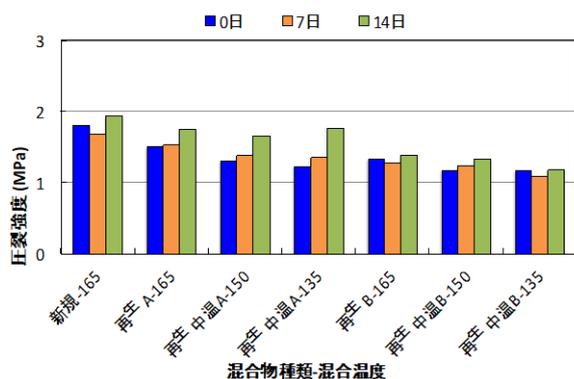


図-15 圧裂強度

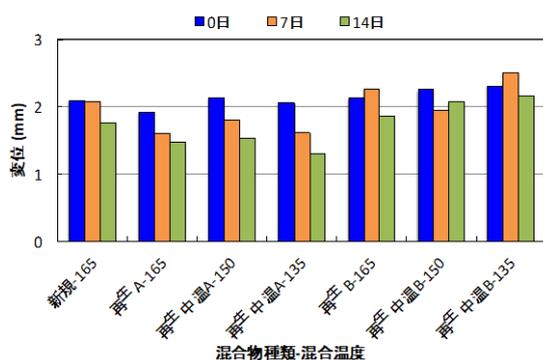


図-16 圧裂変位

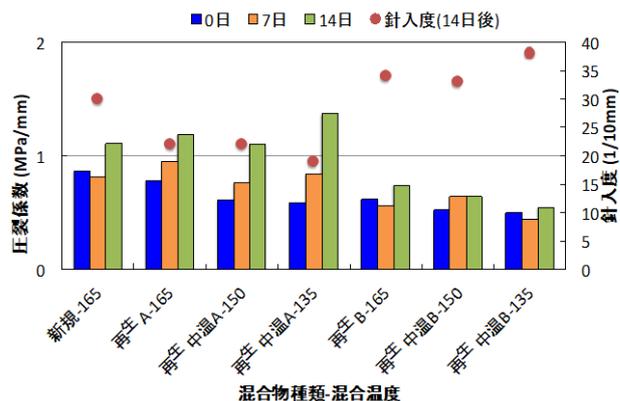


図-17 圧裂係数

8.3.2 カンタブロ試験

図-18 に 20°C で実施したカンタブロ損失率の結果を示す。新規と再生混合物 A では劣化 14 日後のカンタブ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 下で高温カンタブロ試験も実施した。ただし、圧裂試験や 20°C のカンタブロ試験の供試体と同じ再生骨材が入り手困難となってしまったため、20°C でのカンタブロ試験後の供試体を使用した。図-19 に高温カンタブロ損失率を示す。一度 20°C でのカンタブ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。

圧裂係数やカンタブ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。次章で締固め度の影響について報告する。

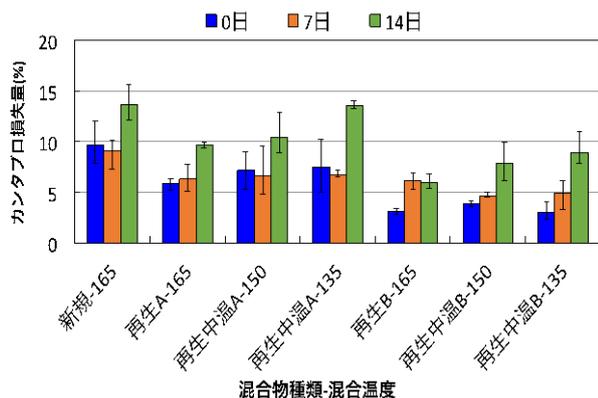


図-18 カンタプロ損失率(20°C)

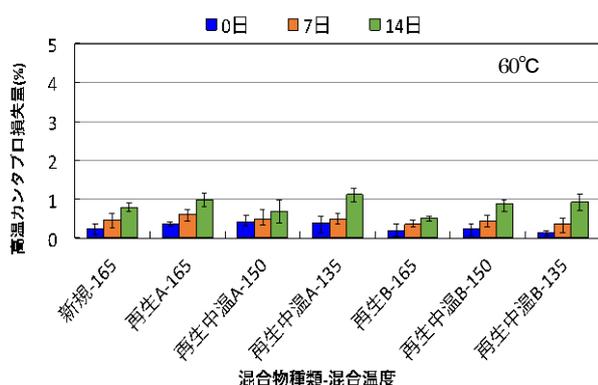


図-19 高温カンタプロ損失率(参考値)

9. 再生中温化混合物の性状に対する締固め度および劣化の影響

9.1 概要

前章において、再生中温化アスファルト混合物の締固め度の違いによって、劣化度合いが異なる可能性が示唆された。実際、現場においても中温化技術の適用による締固め不足が懸念されており、締固め度が想定よりも低くなった場合に、混合物の性状にどの程度影響を及ぼすのかを把握する必要がある。そこで、締固め度の異なる再生中温化アスファルト混合物を用いて促進劣化試験を行い、性状変化を検討した。

9.2 試験概要

9.2.1 試料

試験には、異なる中温化技術や再生用添加剤を用いて作製した再生中温化アスファルト混合物を使用した。中温化技術として、フォームドアスファルトを使用したものと、滑剤系の中温化剤を使用したものの2通りとした。また、フォームドアスファルトで中温化したものについては、再生用添加剤を芳香族系の多いものと飽和分系が多いものの2種類使用して、性状を比較した。なお、再

生用添加剤は前章と同様のものを使用した(表-11)。混合物の種類など、供試体概要を表-13に示す。それぞれの混合物でホイールトラッキング(WT)供試体を作製した。骨材投入量を調整することで、締固め度を100%~94%内で変化させた。ただし、通常温度で混合した再生中温化混合物(再生混合物A、BおよびC)は締固め度100%のみ作製した。なお、再生骨材配合率は60%とした。また、中温化の場合は通常よりも20°C低い温度で混合物を作製した。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-14に示す通りである。

表-13 供試体概要

種類	混合温度(°C)	中温化技術	再生用添加剤
新規混合物	165	-	-
再生混合物A	165	フォームドア	再生用添加剤A (芳香族系)
再生中温混合物A	145	スファルト	
再生混合物B	165	滑剤系中温化	
再生中温化混合物B	145	剤	
再生混合物C	165	フォームドア	再生用添加剤B
再生中温化混合物C	145	スファルト	(飽和分系)

表-14 再生アスファルトに関わる性状

項目	再生中温A	再生中温B	再生中温C
旧アスファルト針入度(1/10mm)	21		
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	19	-
	再生用添加剤B	-	14
アスファルト量(%)	5.4	5.5	
旧アスファルト量(%)	3.5	3.5	

9.2.2 性状試験

WT 供試体を室内にて促進劣化した後、コアを採取して各種性状試験を実施した。

促進劣化として、WT 供試体を110°Cの恒温槽内にて14日間養生した。養生に際し、供試体が崩れるのを防ぎ、なおかつ側面からの空気の入りを遮断するために、エポキシ系樹脂材料で側面をシーリングしてから、アルミの型枠で固定した。促進劣化後、WT 供試体からφ100mmのコアを4個採取した。その内2個を圧裂試験(20°C)に、残り2個を用いて高温カンタプロ試験を行った。また、

性状試験後、アスファルトを抽出回収し、針入度を測定した。

9.3 結果

9.3.1 縮固め度 100%の再生混合物の圧裂試験結果

縮固め度が 100%で、通常温度で混合したもの(図中、再生 A、B、C)および 20℃低い温度で混合した再生中温化混合物の圧裂試験の結果を図-20 から図-22 に示す。圧裂強度は劣化によって増加する傾向にあり、中温化しても圧裂強度は同程度であった。圧裂変位は、劣化によって低下する傾向が見られた。劣化後の再生 A は他の混合物よりやや低い値であった。そのため、図-22 に示すように、再生 A の圧裂係数は他よりも高い結果となった。それ以外の混合物は種類によらず、ほぼ同程度の値であった。今回、圧裂試験は n2 での実施だったこともあり、ばらつきを考慮すると、圧裂強度などの結果に、中温化の有無は影響は小さいものと考えられた。

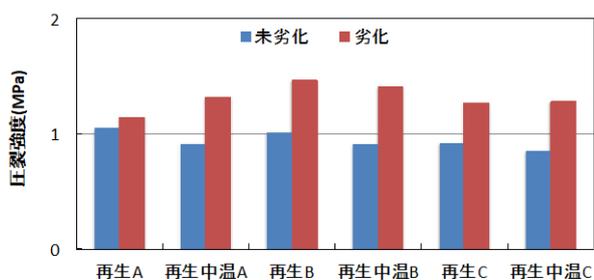


図-20 縮固め度 100%の再生混合物の圧裂強度

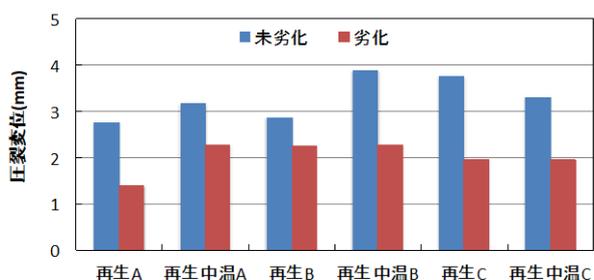


図-21 縮固め度 100%の再生混合物の圧裂変位

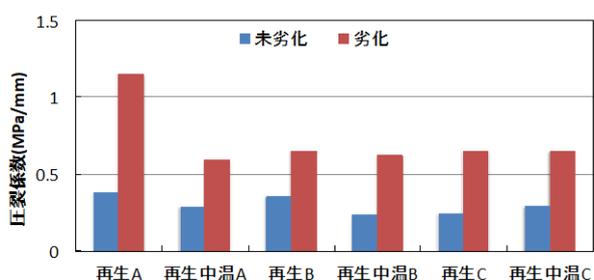


図-22 縮固め度 100%の再生混合物の圧裂係数

9.3.2 再生中温化混合物の圧裂性状に対する縮固め度の影響

新規混合物と再生中温化混合物の圧裂試験の結果を図-23 から図-25 に示す。図-23 の圧裂強度の結果については、混合物の種類によらず、縮固め度が低くなるにつれて圧裂強度が小さくなる傾向が見られた。促進劣化後は、全体的に圧裂強度が高くなる傾向にあった。これは、劣化によりアスファルトが硬くなったためと考えられる。縮固め度が高い範囲では、飽和分系を用いた再生中温化混合物 C の圧裂強度の方がやや低く、芳香族系を用いた再生中温化混合物 A および B の方が高い傾向にあった。ただし、この差は縮固め度が低くなると小さくなっていった。図-24 の圧裂変位については、劣化前では縮固め度が低くなるにつれて変位が大きくなる傾向が見られた。縮固め度が低いものは空隙率が高いため、圧裂した際に内部で骨材が動く隙間があり、結果的に圧裂変位が大きくなったものと考えられた。一方、劣化すると、圧裂変位はほとんど変化が見られなかった。劣化によりアスファルトが硬化し、劣化前のように内部で骨材が動くことなく、小さい変位で破断したことが推察された。図-25 の圧裂係数の結果から、劣化後には圧裂係数が増加する傾向が見られた。新規混合物の場合は、圧裂強度の増加と圧裂変位の減少の両方の影響したために、縮固め度によらず値が変動したのと考えられた。一方、再生中温化混合物は、縮固め度が低くなるにしたがって、圧裂係数が下がる傾向が見られた。これは、縮固め度に対して圧裂変位の変化がほとんどなかったため、圧裂強度の変化が反映されていることが示唆された。再生中温 A、B および C で圧裂係数の差はほとんど見られなかったことから、再生用添加剤の種類や中温化技術の影響は小さいと考えられた。

9.3.3 劣化進行度合いに対する縮固め度の影響

前章では、芳香族系を使用した再生中温化混合物の方が飽和分系のものよりも、促進劣化後の圧裂係数が高く、かつ、針入度が低かったため、劣化が進行したように見えた。一方、本章の試験においては、圧裂係数に対して再生用添加剤の組成の影響は見られなかった。そこで、本試験の供試体の針入度を確認した。図-26 に再生中温 A および C の針入度を示す。未劣化の場合、中温化したもの(図中実線)の方が通常温度で作製した再生混合物(図中破線)よりも針入度が高かった。これは中温化した方が、混合温度が低いため、製造時の熱劣化が軽減されたことを示している。劣化後は、縮固め度が低くなるほど針入度低下し、劣化が進行していることが確認された。この

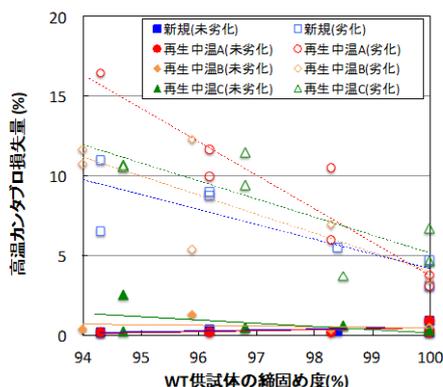


図-28 劣化前後での高温カンタプロ損失率の比較

10. 実環境暴露下における再生中温化混合物の耐候性評価

10.1 概要

室内の促進劣化による再生中温化アスファルト混合物の耐久性を評価してきたが、実環境下での劣化要因としては紫外線の影響は無視できない。本章では、沖縄県大宜味村の暴露場にて約1年間屋外暴露した試験体を用いて、再生中温化アスファルト混合物の実環境下での耐久性を評価した。

10.2 試験概要

10.2.1 試料

混合物は8章と同様の条件で作製したものを使用した。詳細は表-9の通りである。本試験の供試体は、2019年5月から2020年3月まで沖縄県大宜味村の試験場で暴露したものである。

10.2.2 小型曲げ試験

小型曲げ試験とは、20x20x120cmに切り出した供試体で実施する曲げ試験である。低温時の脆性を把握するために用いられるが、表面の劣化度合いを評価するためにも行われている¹³⁾。試験は既往文献¹⁴⁾の方法で実施し、載荷速度は10mm/minとした。試験温度は、脆化点を得るために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に、それぞれの試料毎に微調整した。

10.3 結果

曲げ応力および曲げひずみの結果をそれぞれ図-29 および図-30に示す。再生中温AおよびBはいずれも新規よりも脆化点が低温側に見られた。これは過去の既往文献¹²⁾でも報告されたものであり、再生中温化混合物でも同様の傾向が確認された。暴露した場合、再生中温Aの脆化点は同程度かやや高温側にシフトしており、応力は全体的に低下する傾向にあった。既往研究においても、表面の劣化によって、供用中の再生アスファルト混合物

の曲げ応力が低下したことが報告されている¹³⁾。また、再生中温Bも、再生中温Aと同様で、脆化点は同じか高い方にシフトした。そのため、混合温度を下げたことによる影響や使用した再生用添加剤の種類によらず、同じ暴露条件であれば、同等に劣化が進み、曲げ応力が低下することが示唆された。

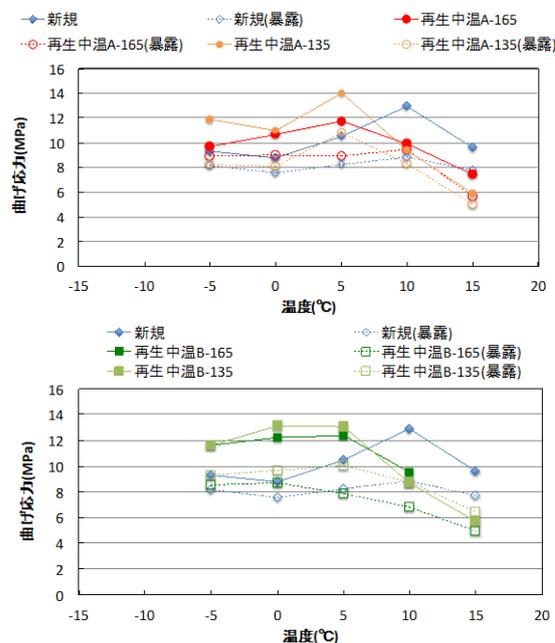


図-29 曲げ応力

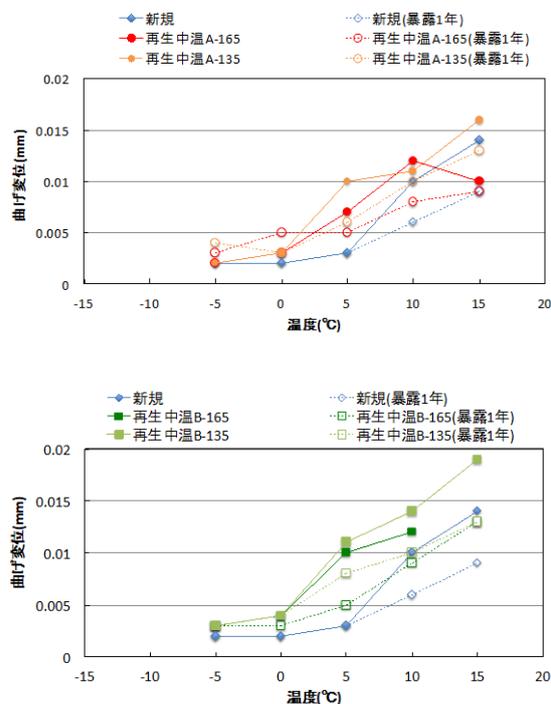


図-30 曲げひずみ

11. まとめ

令和2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℃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℃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℃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。
- ・ 締固め度の異なる再生中温化アスファルト混合物の圧裂強度や圧裂係数については、締固め度が低くなるにしたがって、これらの値が下がることが確認された。
- ・ 促進劣化により、再生中温化アスファルト混合物の高温カンタブロ損失率は、締固め度が低くなるにつれて、増加する傾向にあった。これらの締固め度に対する性状変化において、中温化技術や再生用添加

剤の組成の影響は比較的小さかった。

- ・ 約1年間屋外暴露した再生中温化アスファルト混合物の性状についても、同様に、再生用添加剤の違いによる影響は小さかった。

参考文献

- 1) 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、独立行政法人土木研究所 世紀東急工業株式会社、2015.4
- 2) 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、独立行政法人土木研究所 東亜道路工業株式会社、2015.4
- 3) Tepper A. L. et al : Acute Symptoms Associated with Asphalt Fume Exposure Among Road Pavers. Am. J. Ind. Med., 49, 2006.
- 4) NCHRP: Field Performance of Warm Mix asphalt Technologies, 9-47A Final Report, 2014.
- 5) NIOSH 5042 ; BENZENE-SOLUBLE FRACTION AND TOTAL PARTICULATE(ASPHALT FUME),1998
- 6) ASTM Designation:D6494-99 : Standard Test Method for Determination of Asphalt Fume Particulate Matter in Workplace Atmospheres as Benzene Soluble Fraction,2010
- 7) 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ヒ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講演概要集、2019
- 8) 日本作業環境測定協会、作業環境測定ガイドブック、pp.239-244
- 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、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、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、2018.
- 12) 川上篤史、新田弘之、藪雅行、掛札さくら、川島陽子：繰り返し再生したアスファルト混合物への再生用添加剤と再生骨材配合率の影響、土木学会論文集 E1(舗装工学), vol.76, No.2, I_1-I_2, 2020
- 13) 佐々木徹、新田弘之：促進紫外線劣化試験における舗装表面のアスファルト劣化性状、土木学会論文集 (E1),vol.76,No.2,I_211-I_216, 2020.
- 14) 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、第67回土木学会年次学術講演会、2012.

9.2 リサイクル材等の環境安全性向上技術の構築

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分析した。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分析した。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と、ヒ素、ホウ素の溶出量が増加することを確認した。さらに、盛土内の実現象により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、脱気水飽和カラム試験を考案し実施した。その結果、振とうによる試料細粒化の抑制が酸化分解を抑制することで、従来の水平振とうによる溶出操作に比べて低い重金属溶出量となる傾向を確認し、各手法の有効性を示した。

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の1年間平均濃度と短期溶出試験濃度の比較に基づき、溶出特性評価にあたって、現状ではいずれの元素についても曝露試験などの実現象再現溶出試験の実施が必要であることを示した。また、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。その結果、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、実大盛土試験と土研式雨水曝露試験の浸出水濃度を比較した結果、土研式雨水曝露試験の濃度により、実現象を概ね安全側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、土研式雨水曝露試験、実大盛土試験

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関し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、高額のコスト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～還元環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2年度までに実施した、以下の分析結果を報告する。まず、2mm以下に粉砕した岩ずりを対象に、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するとともに、より還元的な環境を再現する、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（As）・ホウ素（B）の溶出傾向を分析した。次に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と短期溶出試験、酸性化可能性試験を実施し、その結果比較および土研式雨水曝露試験を用いた元素（物質）ごとの溶出パターン分析を行った。さらに、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、実大盛土試験と土研式雨水曝露試験の浸出水濃度を比較した。

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、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、繰返し溶出試験に供した。

2.1.2 繰返し溶出試験方法

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。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、試験を繰り返して実施した。

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内で、水素水溶液と泥岩ずりを PVC ボトル中で混合し

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)

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。

いずれも振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm で 6 時間振とうし、30 分間静置後に、再び 3,000 rpm、30 分間遠心分離した。蒸留水溶液を 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、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、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

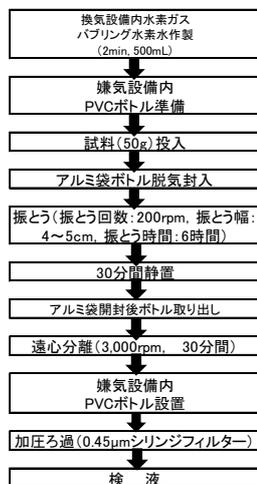


図-1 水素水溶液を用いた繰返し溶出試験方法のフロー図

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200rpm、振とう幅4~5cmで6時間振とうした。一方、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、3,000rpm、30分間遠心分離した。蒸留水溶液を0.45 μ mメンブランフィルターの吸引ろ過により固液分離し、そのろ液を検液とした。その後、試料残渣を用いて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最大8回繰返し、試験を実施した。

また、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。ただし、脱気水を用いた溶出試験の準備・実施・測定をすべて、窒素供給により酸素濃度を0.3ppm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0.3ppm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0.3mg/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30ml程度採取し測定した。脱気水攪拌翼試験は、容量500mlのポリプロピレン製容器に試料1.5g、脱気水150ml、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、試料が細粒化することなく、そのままの状態の水と接触している場合の溶出量を得るため、数個の小さな粒子が移動する程度の流速となる様に設定されたものである。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

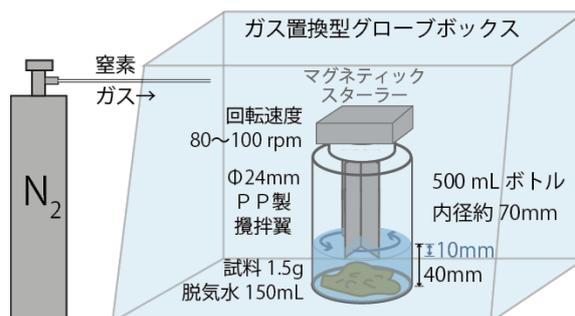


図-2 脱気水を用いた密封攪拌翼試験の概要

後、上澄み液を50ml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 μ m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、元素濃度を比較した。

2.2.5 脱気水を用いた上向流カラム試験方法

盛土施工後の盛土内環境は中～長期的に貧酸素環境となることが知られている。脱気水を用いた振とう溶出試験あるいは、攪拌翼溶出試験では溶出濃度の把握が可能であるが、低酸素環境下での短～中期における溶出傾向の変化を検知できない。また、通常の通水カラム試験や連続バッチ試験では、経時的な溶出傾向の変化を検証可能であるが、大気飽和・酸化条件での実験となる。そこで、脱気水を連続通水することで、盛土内の低酸素環境における短～中期の元素溶出傾向を把握する試験法を考案し、その有効性を検証した。

脱気水を用いた上向流（飽和）カラム試験の概要を図-3に示す。カラムの形状、試料調整、カラムへの充填方法、通水条件については、上向流（飽和）カラム試験方法（ISO-21268-3:2019）に準拠した。ただし、試験前～試験終了時まで、外気流入を遮断したポリタンク内で蒸留水に窒素ガスを10 mL/minの流量で連続バブリングし、溶媒の低酸

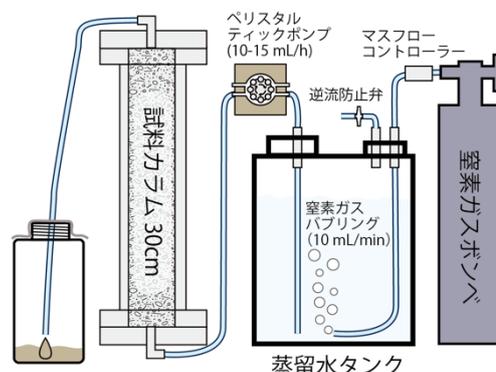


図-3 脱気水上向流カラム試験の概要

素濃度を 1 mg/L 以下に維持し、カラムへ供給した。また、大気飽和した通常の蒸留水を用いる通常の ISO 方式の上向カラム試験と、通常の蒸留水を用いた通水カラム試験を同時に実施し、比較対象とした。

試験試料は、試料の酸化と重金属としてヒ素・セレン・鉛・カドミウムの溶出傾向が検知可能な試料として、黄鉄鉱を含有し酸性化を生じる変質安山岩に、上記重金属元素を高含有する含黄鉄鉱の鉱化堆積岩を重量比で 10% 混合した試料を実験に用いた。カラム充填量は、780 g となった。試験期間は 33 日間で、通水量は 11~12 mL/h に安定した。試験液の採取は、液固比 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.9, 1.3, 2.0, 3.0, 4.0, 6.7, 9.1, 11.1 の計 12 試料を採取した。試験液は前節 2.2.4 と同じ方法で測定を行った。溶媒および試験液の酸素濃度は、少量試料を外気に触れないようバイパス採取し、ガルバニ式の溶存酸素計を用いて測定を行った。溶媒の酸素濃度は、脱気蒸留水が試験開始時 0.9 mg/L (終了時 1.2 mg/L)、通常の蒸留水が開始時に 7.3 mg/L (同、7.5 mg/L) であり、低酸素状態を試験期間中維持した。

2.3 土研式雨水曝露試験と短期溶出試験、酸性化可能性試験との比較

岩石からの重金属等の長期的な溶出濃度やその時間変化の実態を把握するために開発された、土研式雨水曝露試験と、重金属等の溶出特性を把握する手法の一種である短期溶出試験、酸性化可能性試験を同一試料に適用し、元素(物質)毎に試験結果の比較を行った。

土研式雨水曝露試験(図-4)は、ハンマーで粉砕して粒径を約 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

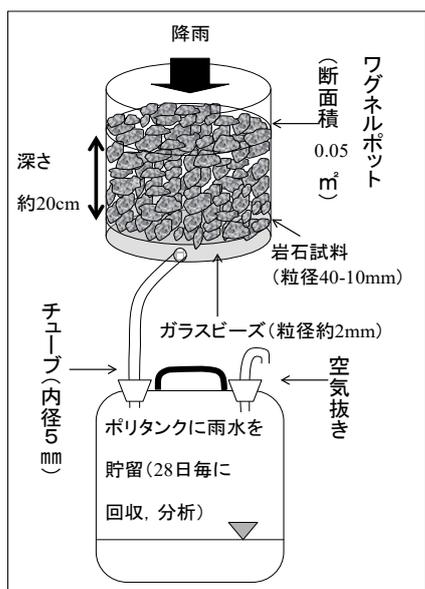


図-4 土研式雨水曝露試験の概要¹⁾

である。本試験は、酸性的で乾湿繰り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ことができる。今回は重金属等の溶出濃度に関しては、地下水環境基準の評価の考え方を準用し、曝露初期 1 年間の平均濃度を長期的な溶出濃度の指標として用いた。pH に関しては 1 年間の最低値を酸性化の指標として用いた。

短期溶出試験は、分取した岩石試料を粉砕し、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砕試料を混合し、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。

今回分析に用いた岩石試料は 79 試料である(後述)。また、元素(物質)毎の試験結果の比較を行った数は表-2のとおりである。また水質の分析項目については試料毎に若干異なるが、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、ヒ素(As)、六価クロム(Cr⁶⁺)、水銀(Hg)、セレン(Se)、フッ素(F)、ホウ素(B)、pH についての結果を示す。

表-2 土研式雨水曝露試験と短期溶出試験の物質別比較実施数

物質名	比較実施数
カドミウム	68
鉛	69
ヒ素	79
六価クロム	64
水銀	65
セレン	60
フッ素	59
ホウ素	59

2.4 土研式雨水曝露試験の元素別溶出パターン分析

土研式雨水曝露試験結果に関し、元素ごとの溶出パターンについて分析を行った。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 試料(表-3)である。

また、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-3 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. 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

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、切土のり面に奥行き最大7m

表-4 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)
分析値	0.017	0.005	<0.02	0.001	<0.0005	0.04

項目	F (mg/L)	B (mg/L)	pH	EC (mS/m)	pH (H ₂ O ₂)
分析値	0.2	0.05	3.3	78.1	1.9

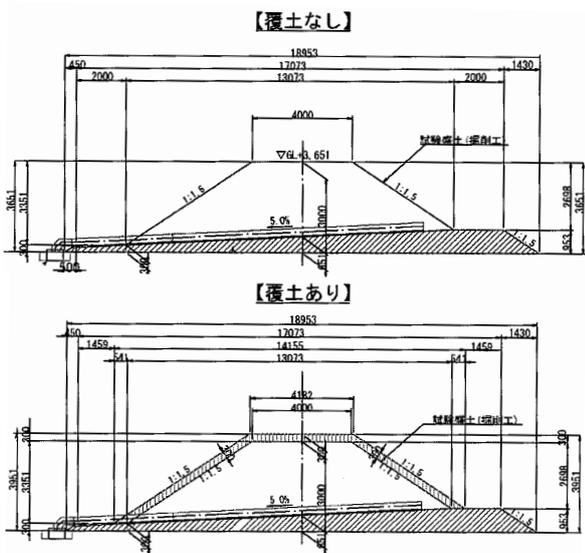


図-5 実大盛土の断面図

程度追い込み掘削され、採取された。なお、表層 30cm 程度の部分は風化による影響を強く受けていると判断し、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-4 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 の盛土を築造 (図-5) 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。

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-6 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

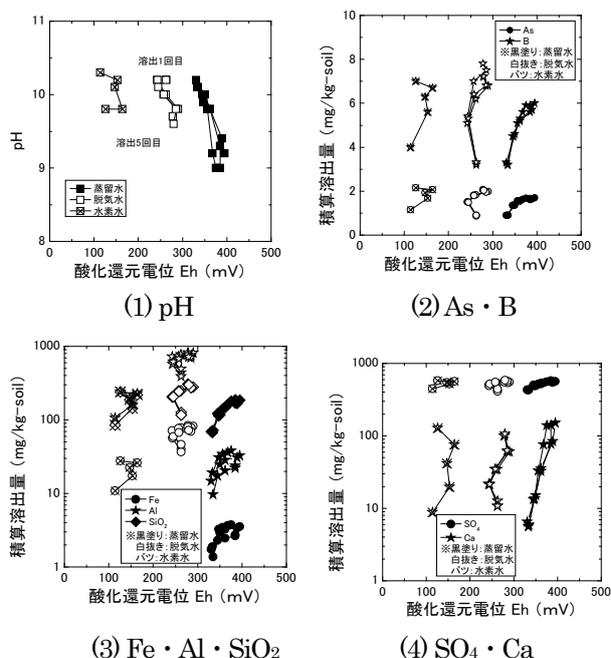


図-6 酸化還元電位と pH および各分析項目の積算溶出量との関係

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、脱気水のもの最大値を示した。そのほか、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い値を示した。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、元素溶出に關係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以下の微少な自形～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-7に示す。溶出1

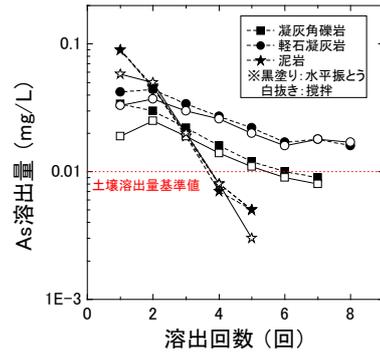


図-7 溶出回数とAs溶出量との関係

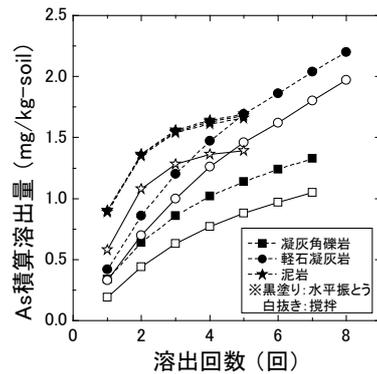


図-8 溶出回数とAs積算溶出量との関係

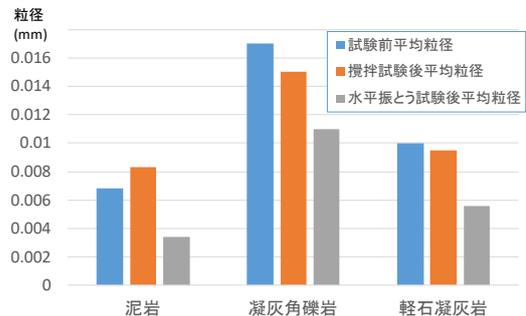


図-9 水平振とうおよび攪拌翼による繰返し溶出試験前後の試料の平均粒径

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溶出量の低下が顕著であった。

溶出回数と積算溶出量との関係を図-8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い値を示した。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-9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-8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

密閉容器に脱気水を封入し実施する攪拌翼試験法の結果を表-5に示す。3試料に共通して、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pH7.12の中性である一方、試験に用いた脱気水はpH9.61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率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、実盛土内の還元的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-10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

表-5 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	

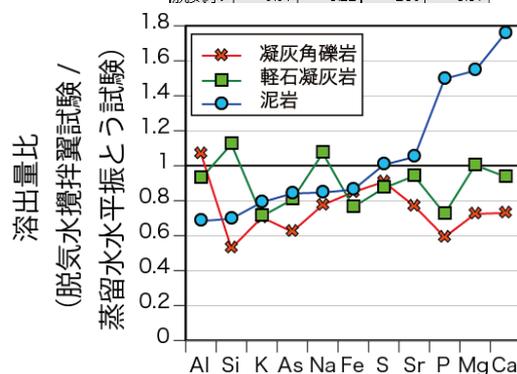


図-10 蒸留水水平振とう試験に対する脱気水攪拌翼試験の元素溶出比

0.028 mg/L (62%に低減)、軽石凝灰岩では0.047mg/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返し溶出試験と同様に、低い濃度を示す結果となった(表-5、図-10)。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擦・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。

盛土内の貧酸素環境における溶出傾向を把握する試験法として、溶媒の初期溶存酸素をコントロールした脱気水上向流カラム試験の実施した結果を図-11に示す。上向流

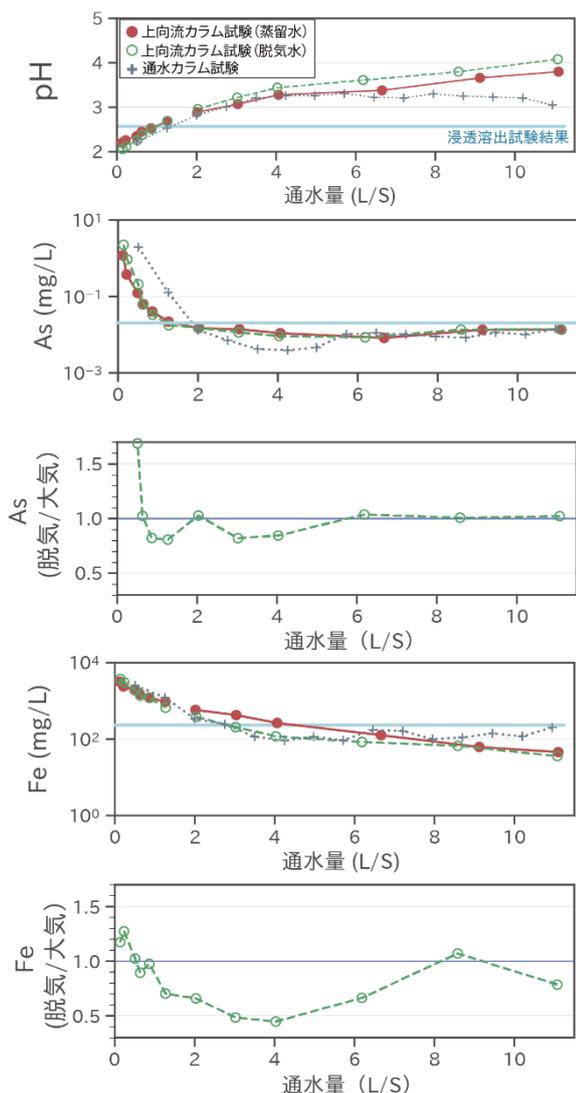


図-11 脱気水を用いた上向流カラム試験の実験結果

カラム試験では、通水する溶媒の酸素濃度の違いに伴い、pH、溶出重金属濃度、酸化の影響を顕著に受ける鉄イオンの濃度に有意な差が検出された。また、試験液の酸素濃度は蒸留水で液固比 2-9 の間で 2.3-3.2 mg/L、同様に脱気蒸留水では、液固比 2-4 で 0.8-1.3 mg/L、液固比 9 の時点で 2.3 mg/L となり、試験初期でより低い酸素濃度を示した。いずれの条件においても、試料の酸化により溶媒中の酸素が消費されていると解釈される。元素の溶出濃度を見ると、特に液固比 1 までの通水初期で、高いヒ素、鉛、セレンなどの重金属類の濃度、鉄などの酸化による影響を強く受ける元素は、脱気水の試験結果で溶出量が高く (As で 50% 超、Fe で 20-30% の増加)、さらに液固比が 1~5 においては、逆に緩やかな溶出速度 (As で -20% 程度、Fe で 最大 -50% 程度低減) へと変化することが確認された。これは、溶媒中の酸素濃度の差に応じて、初期は試料表面に吸着された重金属元素の溶出機構が影響を受け

たものと考えられる。その後通水が進むと、溶媒の酸素濃度の変化に伴い徐々に試料の酸化速度に差が生じた結果と解釈される。液固比 6 以降の溶出傾向に有意な差が認められなくなる結果については、検液の酸素濃度が両カラム共に 2.3 mg/L 前後で安定するため、試料中に残った酸素、あるいは反応で生成された酸素の消費が酸化反応と平衡に達した可能性が考えられるが、現段階では詳細は不明である。

以上から、本試験法により酸化による影響のピークが溶媒の酸素濃度に依存する関係を把握することで、試料の酸化速度とそれに伴った重金属元素の溶出機構を検証できる可能性が示された。また、酸素濃度の差異による顕著な変化が検出される液固比 2 で約 6 日間、液固比 6 の時点で 19 日間の試験時間であり、盛土や実大カラム試験で貧酸素環境の再現に数週間~数ヶ月を要する実大試験に対して、貧酸素環境における溶出傾向の把握を短時間で実施可能となったと考えられる。今後は、酸化速度の異なる試料を用いることで、適切な通水量と速度、検液の酸素濃度変化の把握、試験前後の試料状態の解析を行うことで、本実験法の有効性の検証を続けたい。

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~平成 29 年度においては、酸化と還元に着目した溶出試験方法について、試験を実施してきた。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、評価をするためにも重要な試験であるため、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の明確化に引き続き努めなければならない。その上で、今後の試験方法の取り組みについて、図-12 に示すように盛土内環境を想定した各種実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

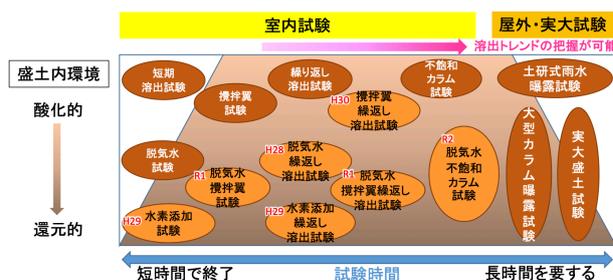


図-12 盛土内環境を想定した各種実現象再現溶出試験の位置づけ

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

表-6 試験に用いた岩石試料と短期溶出試験、酸性化可能性試験および土研式雨水曝露試験の結果
 表中の赤字は、土壤溶出量基準、地下水環境基準(ただしカドミウムについては旧地下水環境基準である0.01mg/L)を上回るもの、酸性化可能性の基準である3.5、土壤酸度が極強酸性の基準である4.5を下回るものを示す。

項目 試料名	岩石名	短期溶出試験								酸性化可 能性試験 pH	曝露試験 (年平均濃度; pHについては年間最低値)									
		Cd	Pb	As	Cr ⁶⁺	Hg	Se	F	B		Cd	Pb	As	Cr ⁶⁺	Hg	Se	F	B	pH	
YN	安山岩	<0.001	0.005	0.005	-	-	-	-	-	3.0	0.000	0.000	0.002	-	-	-	-	-	-	7.3
DM	火山礫凝灰岩	<0.001	0.002	0.005	-	-	-	-	-	3.5	0.000	0.000	0.001	-	-	-	-	-	-	7.6
NK	泥質片岩	<0.001	0.003	0.009	-	-	-	-	-	6.3	0.000	0.000	0.003	-	-	-	-	-	-	7.7
SP	砂岩	<0.001	0.008	0.084	-	-	-	-	-	10.5	0.000	0.000	0.013	-	-	-	-	-	-	7.3
SK2	石英質鉱脈 (硫磁鉄鉱)	<0.001	0.012	2.1	-	-	-	-	-	1.7	0.052	1.242	0.116	-	-	-	-	-	-	2.9
TK	泥質片岩	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.1	<0.1	2.2	0.070	0.000	0.008	0.000	0.000	0.002	0.1	2.2	2.6	
KS	シルト岩	<0.000	<0.001	0.024	<0.001	<0.001	0.005	0.4	<0.1	7.3	0.005	0.000	0.006	0.000	0.000	0.002	0.4	0.1	6.8	
MB1	泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.016	<0.1	<0.1	7.6	0.002	0.000	0.005	0.000	0.000	0.002	0.1	0.2	6.5	
MB2	泥質砂岩	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.001	0.016	0.15	0.1	7.6	0.002	0.000	0.006	0.000	0.000	0.003	1.0	0.5	6.8	
MB3	泥岩	<0.001	<0.001	0.001	0.001	0.001	0.008	0.41	0.1	8.7	0.002	0.000	0.006	0.000	0.000	0.006	0.2	0.6	8.1	
MB4	泥岩	-	<0.001	0.003	-	-	<0.001	0.2	<0.1	3.8	0.001	0.000	0.004	0.000	0.000	0.002	0.0	0.0	7.4	
MB5	泥質砂岩	<0.001	<0.001	0.016	<0.001	<0.001	0.011	<0.1	<0.1	8.6	0.002	0.000	0.010	0.000	0.000	0.004	0.1	0.1	7.6	
SE	凝灰岩	<0.001	<0.001	0.017	<0.001	<0.001	<0.001	0.1	<0.1	8.0	0.002	0.000	0.011	0.000	0.000	0.003	0.0	0.1	7.5	
AI	変質安山岩質凝灰角礫岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	2.3	0.002	0.000	0.019	0.000	0.000	0.011	0.0	2.8	2.3	
US	変質安山岩	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	4.6	0.023	0.000	0.010	0.000	0.000	0.004	1.2	0.0	4.4	
TU	変質安山岩質凝灰角礫岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	2.3	0.009	0.000	0.046	0.000	0.000	0.004	0.3	5.7	2.1	
MR	変質安山岩	<0.001	0.01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-	2.2	0.005	0.000	0.018	0.000	0.000	0.003	0.3	3.2	2.3	
KB1	泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.004	<0.1	<0.1	6.5	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.001	0.2	0.0	3.5	
KB2	泥岩	<0.001	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	<0.1	<0.1	8.5	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	7.1	
KB3	泥岩	<0.001	<0.001	0.024	<0.001	<0.001	0.001	<0.1	<0.1	7.9	0.000	0.000	0.055	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	7.3	
KB4	砂岩・泥岩	<0.001	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	<0.1	<0.1	8.5	0.000	0.000	0.026	0.000	0.000	0.000	0.1	0.0	7.5	
KR	泥岩	<0.001	<0.001	0.008	<0.001	<0.0005	0.009	<0.1	<0.1	4.8	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.004	0.0	0.0	7.5	
KB5	泥岩	<0.001	<0.001	0.007	<0.001	<0.0005	0.005	<0.1	<0.1	7.0	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.005	0.0	0.0	6.9	
AB	変質粘土	0.006	0.55	1.7	<0.001	<0.0005	0.063	<0.1	0.89	1.0	0.043	3.154	13.007	0.000	0.000	0.374	0.1	2.8	1.0	
TT	シルト岩	<0.001	<0.001	0.009	<0.001	<0.0005	<0.001	0.1	<0.1	2.6	0.013	0.002	0.004	0.000	0.000	0.007	7.0	0.0	3.0	
RY1	片麻岩	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.0005	<0.001	0.3	<0.1	-	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	7.6	
RY2	片麻岩	<0.001	0.001	0.008	<0.001	<0.0005	<0.001	0.21	<0.1	-	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	7.8	
Y21	泥岩	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.0005	0.013	0.24	0.51	-	0.000	0.003	0.124	0.000	0.000	0.049	0.6	1.1	8.5	
Y22	泥岩	<0.001	0.001	0.004	<0.001	<0.0005	0.011	0.23	0.32	-	0.000	0.002	0.203	0.000	0.000	0.026	0.7	0.9	8.4	
RY3	片麻岩	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.0005	<0.001	0.31	<0.1	-	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.1	0.0	3.8	
RY4	花崗岩	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.0005	<0.001	0.1	<0.1	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.1	0.0	5.1	
KZ	泥岩	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.0005	0.005	0.2	0.3	-	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.009	0.2	0.7	7.0	
SR	泥岩	<0.001	<0.001	0.018	<0.001	<0.0005	0.008	0.2	0.3	-	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.015	0.5	0.8	7.0	
DG1	泥岩・変質安山岩	<0.001	<0.001	0.006	<0.001	<0.0005	0.009	0.2	0.2	-	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.018	0.2	0.3	7.1	
DG2	泥岩	<0.001	<0.001	0.011	<0.001	<0.0005	0.03	<0.1	<0.1	-	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.038	0.0	0.1	7.2	
KB6	泥岩	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.0005	0.003	<0.1	<0.1	-	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.011	0.0	0.0	4.1	
TE	泥岩	<0.001	<0.001	0.006	<0.001	<0.0005	0.002	<0.1	<0.1	-	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.002	0.0	0.0	7.2	
HG	変質凝灰角礫岩	<0.001	<0.001	0.001	-	-	<0.001	0.44	<0.1	2.6	0.013	0.010	0.697	0.000	0.000	0.001	15.2	0.0	1.5	
HB1	安山岩	<0.001	<0.001	0.001	-	-	<0.001	0.14	<0.1	3.4	0.000	0.001	0.005	0.000	0.000	0.001	0.1	0.0	3.4	
HB2	火山角礫岩	<0.001	<0.001	0.013	-	-	<0.001	0.15	<0.1	2.7	0.020	0.002	0.036	0.000	0.000	0.011	4.3	0.0	2.3	
NG1	花崗岩	-	-	<0.001	-	-	-	2.3	-	-	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.9	0.0	6.5	
NG4	風化花崗岩	-	-	0.031	-	-	-	0.2	-	-	0.000	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.4	0.0	6.7	
NG7	風化花崗岩	-	-	<0.001	-	-	-	0.6	-	-	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.4	0.0	6.7	
NG10	変質玄武岩	-	-	<0.001	-	-	-	0.4	-	-	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.6	0.0	6.2	
NG13	風化花崗岩	-	-	0.007	-	-	-	1.9	-	-	0.000	0.000	0.358	0.000	0.000	0.000	0.6	0.0	6.3	
UT1	砂質泥岩	<0.001	0.0001	0.015	<0.001	<0.0005	0.007	0.2	0.79	-	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.054	0.5	1.2	7.8	
UT2	砂質泥岩	<0.001	0.0001	0.001	<0.001	<0.0005	0.011	0.3	0.57	-	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.056	0.6	0.9	8.0	
UT3	凝灰質砂岩	<0.001	0.0001	0.011	<0.001	<0.0005	0.002	0.1	0.08	-	0.002	0.004	0.001	0.000	0.000	0.026	0.4	0.4	4.0	
OK1	頁岩	-	-	0.016	-	-	-	-	-	6.8	-	-	0.035	-	-	-	-	-	7.6	
OK2	頁岩	-	-	0.034	-	-	-	-	-	7.3	-	-	0.057	-	-	-	-	-	7.7	
OK3	頁岩	-	-	0.012	-	-	-	-	-	6.8	-	-	0.019	-	-	-	-	-	7.7	
OK4	砂岩	-	-	0.011	-	-	-	-	-	6.7	-	-	0.030	-	-	-	-	-	7.8	
OK5	頁岩	-	-	0.015	-	-	-	-	-	7.2	-	-	0.024	-	-	-	-	-	7.6	
AT1	泥岩	<0.001	<0.001	0.009	<0.001	<0.0005	<0.002	0.37	0.1	2.3	0.039	0.019	0.020	0.026	0.000	0.123	10.8	0.2	2.5	
AT2	珪化変質泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	0.017	0.44	<0.1	2.3	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.3	0.0	3.2	
AT3	珪化変質泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	0.007	0.68	<0.1	2.2	0.029	0.043	0.002	0.000	0.000	0.061	1.2	0.0	2.9	
AT4	珪化変質泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.002	0.17	<0.1	2.9	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.006	0.0	0.0	2.8	
AT5	珪化変質泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	0.018	<0.08	<0.1	2.4	0.029	0.010	0.006	0.053	0.000	0.154	2.9	0.0	2.6	
AT6	珪化変質泥岩	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	0.006	0.09	<0.1	2.1	0.050	0.003	0.013	0.074	0.000	0.124	4.9	0.0	2.5	
AT7	脈状変質ドレライト	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.002	0.08	<0.1	2.6	0.004	0.001	0.004	0.026	0.000	0.032	4.0	0.0	2.6	
AT8	脈状変質泥岩	0.014	0.01	<0.001	<0.001	<0.0005	0.003	0.23	<0.1	1.7	0.183	0.005	4.728	0.244	0.000	0.950	34.7	2.5	1.5	
AT9	珪化変質泥岩	0.001	<0.001	0.012	<0.001	<0.0005	0.016	0.22	<0.1	1.8	0.071	0.005	0.174	0.116	0.000	0.212	6.3	0.1	2.2	
TH1	泥岩・砂岩	<0.001	0.002	0.046	<0.001	<0.0005	<0.001	0.17	<0.1	3.4	0.006	0.016	0.001	0.000	0.000	0.012	1.0	0.0	3.5	
TH2	凝灰質礫岩	<0.001	0.001	0.032	<0.001	<0.0005	<0.001	0.38	<0.1	3.0	0.000	0.001	0.012	0.000	0.000	0.007	0.0	0.0	7.2	
TH3	砂質凝灰岩	&																		

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、攪拌翼による溶出試験、還元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。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、大型カラム試験や実大盛土試験が有効であると考え。攪拌翼による繰返し溶出試験や不飽和カラム試験は、試験の実施例が少ないため、タンクリーチング試験などの試験と比較検証する必要があり、データの蓄積を図ることが必要と考える。

3. 4 土研式雨水曝露試験と短期溶出試験結果の比較

試験に用いた 79 試料の岩石の種類、短期溶出試験、酸性化可能性試験および土研式雨水曝露試験の結果を表 6 に示す。また、短期溶出試験結果と土研式雨水曝露試験の曝露初期 1 年間の平均濃度を元素毎に比較した結果を図-13~20 に示す。表中の赤字は、溶出試験結果が土壌溶出量基準値を上回るもの、酸性化可能性試験の酸性化可能性の指標である 3.5 を下回るもの、曝露試験の年平均値が地下水環境基準値（カドミウム Cd については旧地下水環境基準値である 0.01mg/L）を上回るもの、および浸出水 pH が土壌酸度の極強酸性土の指標である 4.5 を下回るものを示す。図中の赤丸は酸性化可能性試験結果が酸性化可能性の指標である pH3.5 を下回るもの、青丸は 3.5 以上のものを、また赤線は地下水環境基準値を、黒線は短期溶出試験濃度と曝露試験濃度の比が 1:1 となるラインを示す。なお本論では、浸出水の pH が 4.5 を下回った状態を酸性化ということとする。

3.4.1 酸性化の評価方法

酸性化可能性試験を実施した 59 試料に関して、1 年間の曝露期間内に酸性化した 33 試料のうち、2 試料の例外を除いて酸性化可能性試験結果が酸性化可能性の基準を下回った（表-6）。酸性化可能性の基準を下回ったが 1 年間の曝露期間内に酸性化しなかったものが 31 試料のうち 3 試料存在したが、試験開始から数年後に浸出水の pH が極強酸性土の基準を下回るものもあり、酸性化可能性に関しては酸性化可能性試験によってほぼ適切に判定可能であると考えられる。

3.4.2 元素毎の溶出特性の評価方法

短期溶出試験と土研式雨水曝露試験との結果を元素毎に示し、重金属等の溶出特性の評価方法について考察する。

1) カドミウム (Cd)

カドミウム (図-13) は、短期溶出試験で検出されない

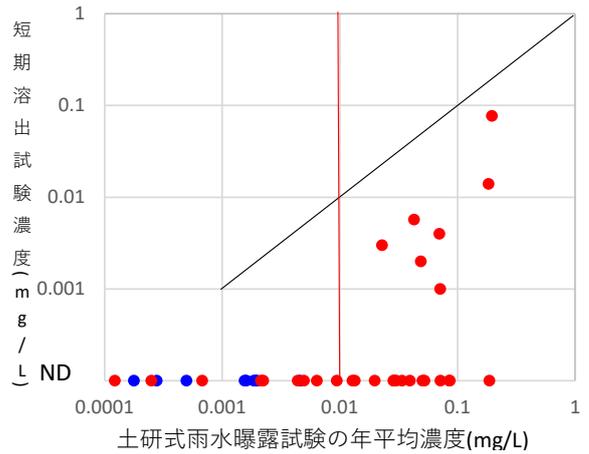


図-13 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(Cd)

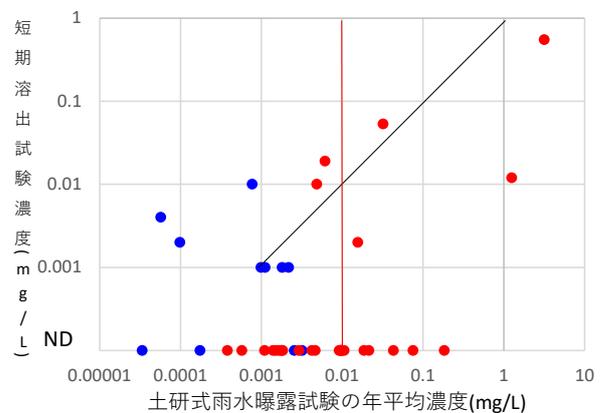


図-14 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(Pb)

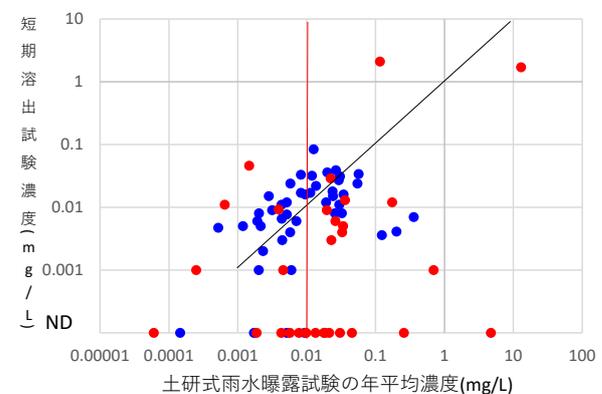


図-15 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(As)

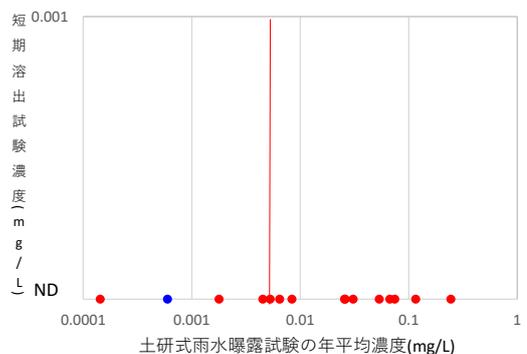


図-16 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(Cr⁶⁺)

ものでも曝露試験で地下水基準値を上回ることがある。これらの試料はすべて酸性化するものであった。また、短期溶出試験で濃度が検出されたものについてみると、いずれも曝露試験濃度の方が一桁程度高い濃度を示した。これらのことから、カドミウムは酸性化に伴って溶出が促進されると考えられ、短期溶出試験による評価は困難であると考えられる。

2) 鉛 (Pb)

鉛 (図-14) は、短期溶出試験結果と曝露試験結果に正の相関があるグループと、短期溶出試験で検出されないが曝露試験で地下水環境基準値を上回るグループに二分されるように見えるが、曝露試験結果が地下水環境基準値を上回るものは酸性化するものに限られる。鉛については短期溶出試験の操作によって、非溶存態の鉛を含む微粒子の発生があることが知られており、短期溶出試験で鉛を検出するが曝露試験で濃度が低いものについては非溶存態の鉛を検出している可能性がある。また、酸性化に伴って溶出が促進されると考えられる試料が存在することから、短期溶出試験による評価は安全側に評価する場合と危険側に評価する場合があることがわかる。

3) ヒ素 (As)・セレン (Se)

ヒ素 (図-15) とセレン (図-18) は、溶出傾向が似る。いずれも短期溶出試験と曝露試験の結果に相関があるグループに属するものが比較的多く、短期溶出試験で土壤溶出量基準値を上回り、かつ曝露試験でも地下水環境基準値を上回る試料が多いことが特徴である。ただし、その値については1桁程度のばらつきが見られる。特にセレンについては短期溶出試験の濃度が高いものほど曝露試験の濃度がより高い方に乖離する傾向が見られる。また、酸性化に伴って溶出が促進されると考えられる試料も存在する。以上のように短期溶出試験による評価は安全側に評価する場合と危険側に評価する場合があることがわかる。

4) 六価クロム (Cr⁶⁺)

六価クロム (図-16) については短期溶出試験ですべて検出下限値以下であったが、曝露試験では検出されるものがあった。これらは1検体を除きすべてが酸性化するものであり、浸出水のpHが2.6以下の強酸性を呈するものに限られる (表-6)。岩石中のクロムの存在状態は一般的には三価であるとされており、強烈的な酸化反応が起こる状況下で、三価のクロムが六価に酸化されうること示す結果であると考えられる。

5) 水銀 (Hg)

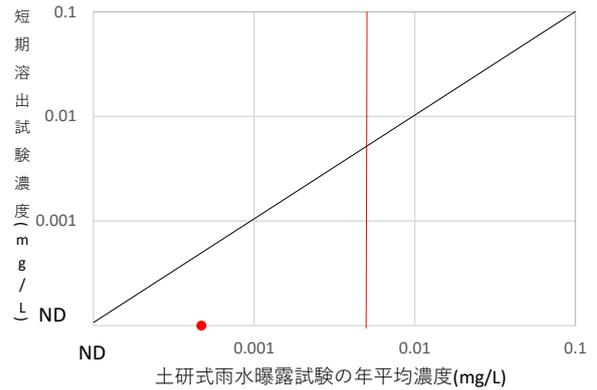


図-17 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(Hg)

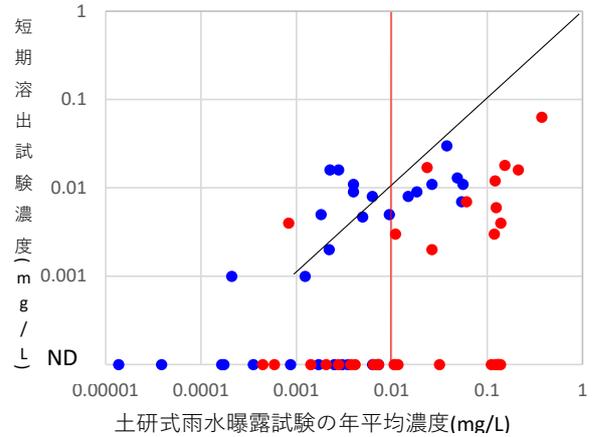


図-18 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(Se)

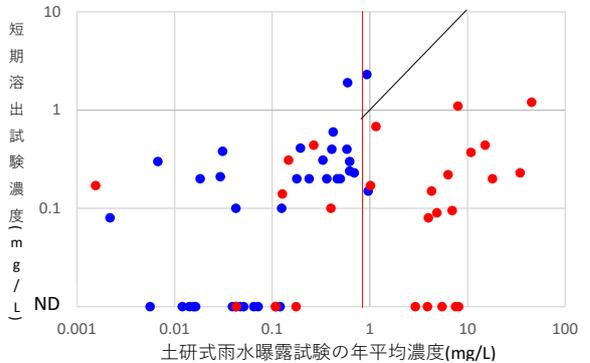


図-19 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(F)

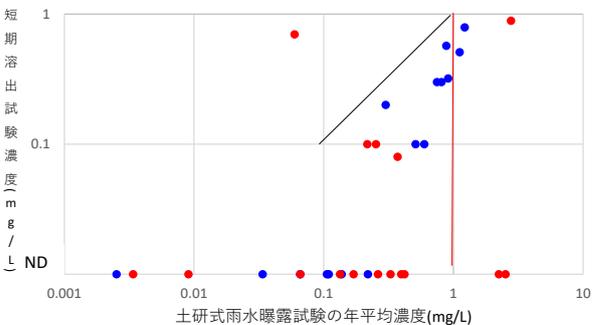


図-20 短期溶出試験と土研式雨水曝露試験の比較(B)

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

水銀 (図-17) については短期溶出試験で検出されたものは皆無であった。また曝露試験もわずかに1検体検出されたのみであった。水銀が検出される事例は非常にまれであるため、一般的な溶出特性の評価方法の議論は困難である。

6) フッ素 (F)

フッ素 (図-19) は、短期溶出試験と曝露試験との結果の相関が著しく悪く、濃度の乖離が著しい場合が多い元素である。曝露試験結果が地下水環境基準値を上回る事例のほとんどは酸性化する事例で、短期溶出試験で溶出特性の把握が全く困難である。従って現状においては曝露試験による評価が必要な元素であると考えられる。フッ素については水溶液中ではアルカリ側で溶出しやすいと一般的に考えられており、溶出機構を含めて今後詳しい検討が必要な物質である。

7) ホウ素 (B)

ホウ素 (図-20) は、短期溶出試験結果と曝露試験結果に正の相関があるグループと、短期溶出試験で検出されないが曝露試験で地下水環境基準値を上回るグループに二分されるように見えるが、曝露試験結果が地下水環境基準値を上回るものはあまりない。また、短期溶出試験と曝露試験との間に正の相関があるものについてみると、曝露試験結果が短期溶出試験結果の数倍程度の濃度

となっており、短期溶出試験では危険側に評価する場合が多いことがわかる。ホウ素の溶出についてはあまり知見が多くないことから、溶出機構を含めて今後詳しい検討が必要な物質である。

3.4.3 酸性化と重金属等の溶出

浸出水の曝露開始1年間の平均値が何らかの物質で地下水環境基準値を上回った試料は、その多くが酸性化したものであった。特にカドミウム、鉛、ホウ素については基準値を上回ったすべての試料が酸性化するものであった。ヒ素、セレン、フッ素については酸性化しないものでも地下水環境基準値を上回るものが59試料中16試料存在したが、そのすべては環境基準値の6倍以下であり、曝露試験で浸出水濃度が著しく高いものは酸性化するものに限られることがわかった。

3.5 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-7 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-8 に整理した。また図-21 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未満の強酸性条件で溶

表-7 各試料の短期溶出試験、酸性化可能性試験結果および土研式雨水曝露試験の浸出水濃度変化パターン

試料名	地質年代	岩種	実験期間 (日)	酸性化可能性試験・短期溶出試験								曝露試験の液性・各元素の平均濃度の変動パターン ^(注)							
				pH(H2O2)	pH(H2O)	Cd	Pb	As	Se	F	B	pH	Cd	Pb	As	Se	F	B	
KZ	新第三紀	泥岩	1820	-	10.9	<0.001	<0.001	0.002	0.005	0.2	0.3	弱塩基			A	A	E	A	
SR	新第三紀	泥岩	1820	-	9.2	<0.001	<0.001	0.018	0.008	0.2	0.3	弱塩基			B	A	B	A	
DG1	新第三紀	泥岩 変質安山岩	1820	-	9	<0.001	<0.001	0.006	0.009	0.2	0.2	弱塩基			A	A	A	A	
DG2	新第三紀	泥岩	1820	-	9.2	<0.001	<0.001	0.011	0.03	<0.1	<0.1	弱塩基			A	A	A	A	
KB6	古第三紀	泥岩	1736	-	7.9	<0.001	<0.001	0.001	0.003	<0.1	<0.1	弱酸		C		A	C	A	
TE	ヘルム紀	頁岩	1736	-	8.3	<0.001	<0.001	0.006	0.002	<0.1	<0.1	弱塩基		A	A			A	
AT1	新第三紀	泥岩	700	2.4	9.3	<0.001	<0.005	0.009	<0.002	0.25	0.1	強酸	C	C	C	C	C	A	
AT2	新第三紀	泥岩(珪化変質)	700	2.3	7.6	<0.001	<0.005	<0.005	0.017	0.44	<0.1	弱酸		A		A	E		
AT3	新第三紀	泥岩(珪化変質)	700	2.2	7.3	<0.001	<0.005	<0.005	0.007	0.28	<0.1	強酸	E	D	A	A	C		
AT4	新第三紀	泥岩(珪化変質)	700	2.9	9	<0.001	<0.005	0.006	<0.002	0.17	<0.1	強酸		A		A			
AT5	新第三紀	泥岩(珪化変質)	700	2.4	5.7	<0.001	<0.005	<0.005	0.018	<0.08	<0.1	強酸	B	D		A	E		
AT6	新第三紀	泥岩(珪化変質)	700	2.1	6.8	<0.001	<0.005	<0.005	0.006	0.09	<0.1	強酸	B	A	B	A	C		
AT7	新第三紀	ドレライト(脈状変質)	700	2.6	7.8	<0.001	<0.005	<0.005	<0.002	0.08	<0.1	強酸	D	D	D	D	D	D	
AT8	新第三紀	泥岩(脈状変質)	700	1.7	3.9	0.014	0.005	<0.005	0.003	0.23	<0.1	強酸	A	C	A	A	A	A	
AT9	新第三紀	泥岩(珪化変質)	700	2.2	8.6	<0.001	<0.005	0.012	0.005	0.22	<0.1	強酸	A	A	A	A	A	A	
NA1	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	364	2.3	7.4	<0.001	<0.001	0.006	0.001	<0.08	<0.1	強酸	E	C	C	E	C	A	
NA2	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	364	2.1	7.5	<0.001	0.026	<0.001	0.001	<0.08	<0.1	強酸	A	C	B	A	A	A	
NA3	新第三紀	砂岩(熱水変質)	364	2.3	6.5	<0.001	0.053	0.003	<0.001	<0.08	<0.1	強酸	E	C	E	C	C	A	
NA4	新第三紀	砂岩(熱水変質)	364	2.2	6.4	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.08	<0.1	強酸	C	C	E	C	C	A	
NA5	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	364	1.6	5.4	<0.001	<0.005	<0.005	0.004	<0.08	0.1	強酸	C	C	E	C	C	A	
NA6	新第三紀	シルト岩(熱水変質)	364	2.7	7.8	<0.001	<0.005	0.029	0.003	1.1	0.7	強酸	C	C	C	C	C	E	
NA7	新第三紀	砂岩(熱水変質)	364	2.2	3.1	0.002	0.019	<0.005	<0.002	1.2	<0.1	強酸	A		A	A	A	A	
NA8	新第三紀	砂岩泥岩互層(熱水変質)	364	2.2	6.9	<0.001	<0.005	<0.005	<0.002	0.2	<0.1	強酸	C		C	C	C	E	
NG3	古第三紀	花崗岩	1540	-	-	-	-	<0.001	-	2.3	-	中性			A		B		
NG6	古第三紀	花崗岩(風化)	1540	-	-	-	-	0.031	-	0.2	-	中性			A		A		
NG9	古第三紀	花崗岩(風化)	1540	-	-	-	-	<0.001	-	0.6	-	弱酸					A		
NG12	古第三紀	玄武岩(変質)	1540	-	-	-	-	<0.001	-	0.4	-	中性					A		
NG15	古第三紀	花崗岩(風化)	1540	-	-	-	-	0.007	-	1.9	-	弱酸			E		B		
TH1	第四紀	砂質泥岩互層	364	3.4	7.8	<0.001	0.001	0.032	<0.001	0.38		弱酸	C	C	B	B	C		
TH2	第四紀	凝灰質礫岩	364	3	8.2	<0.001	<0.001	0.024	<0.001	<0.08	<0.1	中性		C	C	A	A		
TH3	第四紀	砂質凝灰岩	364	10.8	9	<0.0003	0.001	0.012	<0.001	<0.08	<0.1	中性		C	E	A	C		
TH4	第四紀	凝灰質砂岩	364	8.1	8.5	<0.001	<0.005	0.017	<0.001	<0.08	0.002	中性		C	A	A	A		
TH5	第四紀	泥岩	364	5.1	7.2	<0.0003	0.01	0.033	<0.001	<0.08	<0.1	中性		E	A	C			
TH6	第四紀	火山凝灰岩互層	364	3.3	7.6	<0.0003	0.002	0.036	<0.001	<0.08	<0.1	中性		C	E	A	D		
TH7	第四紀	凝灰質礫岩	364	8.9	7.4	<0.0003	0.001	0.022	<0.001	0.31	<0.1	中性		C	C	E	D		
TH8	第四紀	凝灰質砂岩	364	8.9	9.3	<0.0003	0.001	0.027	<0.001	<0.08	<0.1	中性		C	C	A	A		
TH9	第四紀	凝灰質礫岩	364	4	9.2	<0.0003	0.004	0.039	<0.001	0.08	<0.1	中性		E	A	A	A		
UT1	新第三紀	砂質泥岩	784	-	10.1	<0.001	<0.001	0.015	0.007	0.2	0.79	弱塩基	C		B	C	E		
UT2	新第三紀	砂質泥岩	784	-	9.4	<0.001	<0.001	0.001	0.011	0.3	0.57	弱塩基			A	B	B		
UT3	新第三紀	凝灰質砂岩	784	-	9.2	<0.001	<0.001	0.011	0.002	0.1	0.08	弱酸	C		A	C	B		

(注) 変動パターン A: 初期(200日以内)に最高濃度が得られ、その後1年以内に濃度が半減する。 B: 濃度ピークが得られた後に、濃度低減が緩やか。 C: 濃度がある時点から上昇。 D: 濃度が不規則に変化。 E: 濃度変化が比較的フラット。 **太字**は平均濃度が一時的に地下水環境基準値を満足しなかった試料。

表-8 元素別土研式雨水曝露試験の濃度変化パターン集計結果

パターン	Cd	Pb	As	Se	F	B	計
A	4	5	9	23	12	15	68
B	2	0	4	2	4	2	14
C	6	16	8	6	15	0	51
D	1	3	1	1	2	1	9
E	3	0	8	1	4	3	19
計	16	24	30	33	37	21	161

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增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 が多いとの印象があったが、今回整理したデータでは C や E も認められ、溶出機構について更なる検討が必要であると考えられる。

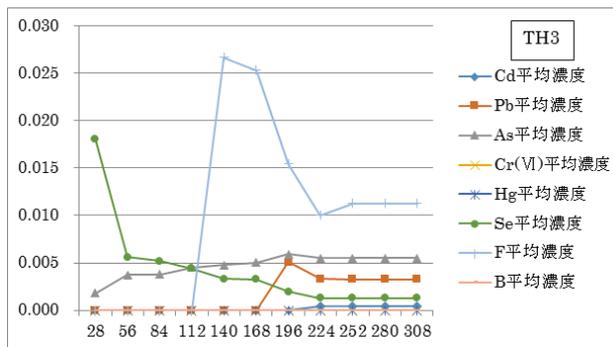
4) セレン (Se)

セレンは花崗岩以外の地質から溶出が認められた。また、pH についても様々な環境で溶出が認められた。

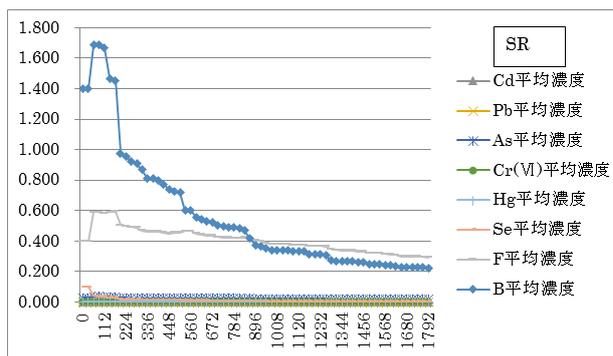
濃度変化パターンを見ると、その多くは初期に濃度ピークが認められる A であった。これはセレンが主にセレン酸塩の形態を取り水に溶解しやすい²⁾こと、および岩石中の含有量が一般に少ないことと整合するものである。ある時点から濃度が上昇する、パターン C に分類されるものは、酸性化する試料に限られた。

5) フッ素 (F)

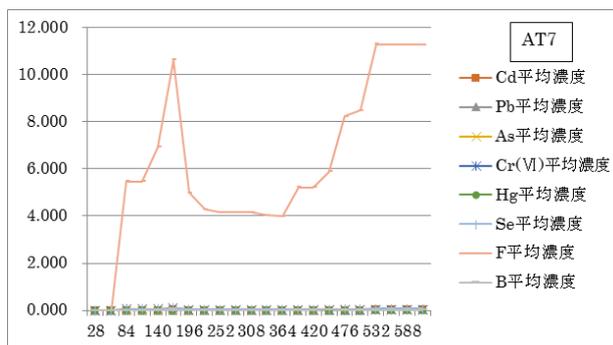
フッ素は、今回試験したすべての岩種から溶出が認められた。酸性化する変質岩から著しく高濃度の溶出が認められ、これらはパターン C が比較的多かった。一方、浸出水が塩基性のものではパターン A が比較的多かつ



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-21 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。

た。これは岩石中のフッ素の存在形態が異なるためかも知れない。

6) ホウ素

ホウ素は変質岩と泥岩からの溶出が多く認められた。堆積岩からのホウ素の溶出は、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。ホウ素化合物は一般的に溶解度が高く²⁾、濃度変化のパターンは A が多い。なお、ホウ素についてはある時点から濃度が増加するパターン C は認められなかった。

濃度変化の各パターンに該当するものは、下記の特徴が見いだされる。

- 1) 溶出初期に濃度ピークが現れ、その後濃度が急激に減衰するパターン A は、数としては多く、特に非酸性のセレン、フッ素に多い。
- 2) 初期に溶出濃度ピークが現れるが濃度の減衰があまり認められないパターン B は、比較的数量が少なく、濃度が低いものに多い。
- 3) 溶出濃度が曝露期間の途中から増加するパターン C は、酸性化するものに多く、短期溶出試験濃度より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. 6 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-22 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-23 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。

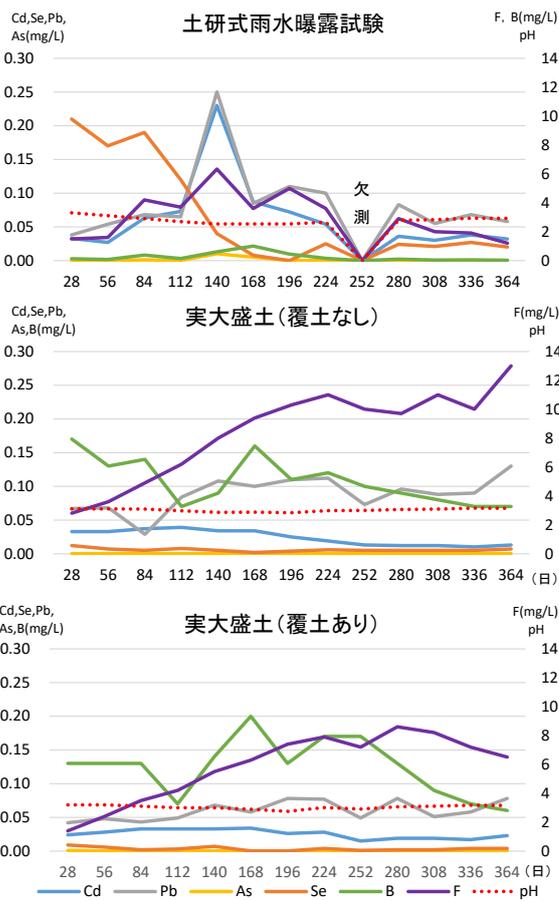


図-22 364 日間の浸出水分析結果

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)

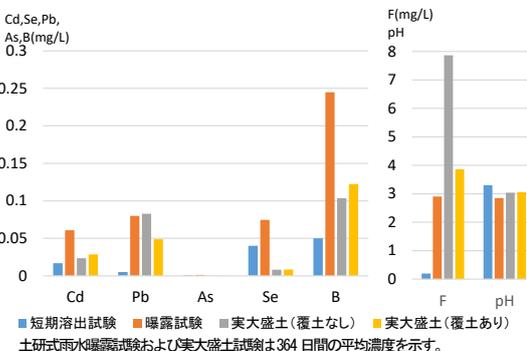


図-23 各種試験結果の比較

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。

フッ素については、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。

ホウ素については、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）のフッ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 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ヒ素積算溶出量は、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砕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) 脱気水を用いた上向流カラム試験法を考案し、実施した結果、蒸留水試験結果との対比により、溶媒酸素濃度の差に伴う液性および元素溶出傾向の変化を把握することが可能であり、短期間で盛土内の低酸素環境における溶出傾向を把握する試験法としての有効性を確認した。
- 5) 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の 1 年間平均濃度と短期溶出試験濃度の比較に基づき、現状ではいずれの元素についても曝露試験などの実現象再現溶出試験の実施が必要であることを示した。
- 6) 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。
- 7) 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）、住鉱コンサルタント（株）、日本工営（株）

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

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) 島田允亮：自然由来重金属と環境汚染—応用地質学・地球化学的データベース—、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実施し、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。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、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。さらに、盛土内の貧酸素環境における天然・人工資材の中和・吸着性能を評価する手法として、貧酸素上向流多段カラム試験を考案し、溶媒酸素濃度の違いによる中和・吸着機構の解析を行い、試験法の適用性を確認した。

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壤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、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碎し、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、北海道土壌図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菌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

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	

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 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。

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

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

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、吸着剤を固液比 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2mm以下に粉碎、500mlボトルに蒸留水300mlと試料30gを（固液比1:10）で封入し、6時間、200rpm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0.45μm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、200rpm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20mlに中和剤0.1gを添加したものと、中和剤0.1gと吸着剤0.05gを添加したものの、計2ケースを実施した。

2.1.4 中和・吸着材の貧酸素環境下での性能評価試験

重金属元素の中和・吸着・共沈などの反応機構を用いた各種の不溶化・中和・吸着資材についてはバッチ・カラム試験などの室内実験により、性能評価が行われている。しかしながら、多様な地質材料を背景とし、長期的に貧酸素環境となる盛土内環境を模した性能評価法は定まっていない。そこで脱気水を用いたISO方式のカラム試験を考案し、溶媒酸素量の差異による重金属および共存元素の溶出傾向の把握を行った。

通常の盛土・埋土処理で想定される、盛土内環境は貧酸素環境下における浸透水の不飽和通水接触による反応が想定され、中和・吸着・不溶化処理などの評価も実環境における現象を踏まえて調査・設計する必要がある。しかし、大気飽和した短期溶出試験・吸着性能試験では、酸化が顕著な地質試料に対しては、実環境における諸現象の評価が困難あるいは不十分であることが想定される。そこで、連続溶出試験の一種として貧酸素条件下における多段上向流（飽和）カラム試験を実施し、大気条件下での連続通水カラム試験（不飽和カラム試験）との比較により、試験法の有効性を検討した。

試験試料は、酸性変質安山岩を母材に、ヒ素・セレン・鉛を高濃度で溶出する黄鉄鉱を主体とする鉱化堆積岩を重量比10%で混合した試料を用いた。重金属元素の

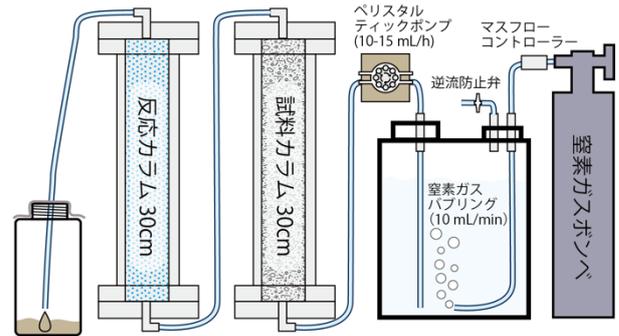


図-1 脱気水を用いた上向流多段カラム試験の概要

中和・吸着性能を持つ資材として、焼成ホタテ貝粉末を用いた。試験試料、中和・吸着資材はともに粒径を2mm以下に調整し試験に用いた。溶出試験液の測定は2.1.3と同じ手法を用いた。

比較対象となる通水カラム試験（不飽和カラム試験）として、内径5cm、高さ60cmと90cmのカラムを作成し、それぞれ上部30cmは給水時の水頭スペースとして、前者は下部に試料30cmのみ、後者は試料30cmの下にガラスビーズと資材の混合層30cmを充填した。1～3日おきにカラム上部から蒸留水588ml（水/岩石の重量比で0.75、カラム内の水頭30cmに相当）を計15回にわたり注ぎ、試験液を作成した。15回通水後の水/試料の重量比は10.9となった。

考案した脱気水を用いた上向流カラム試験装置の概要を図-1に示す。外気遮断したポリタンク中に試験期間中、常時10mL/minで窒素バブリングを行うことで、試験水の酸素濃度を1mg/L以下に維持し、試験カラムへと供給する方式とした。上向流カラム試験による中和・吸着性能検証試験では、粒径2mm以下に調整した試料780gを高さ30cmに封入した溶出試験カラムと、中和・吸着層を想定したガラスビーズと中和材を充填した反応カラムとの2段カラム方式を用いた。その他の試験方法はISO-21268-3:2019に準拠した。なお、実施工における中和層への資材添加量を50kg/m³、中和層と対策土の比率を1:10と想定し、平均粒径2mmのガラスビーズ930g（30cm）に対して2.95gを添加・混合し実験を行った。33日間の試験期間を通じて通水速度は11～12mL/hと安定であった。

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調査として、インターネットを利用し「吸着層」、「設計」、「盛土」をキーワードに自然由来重金属等への対策工法に関する文献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

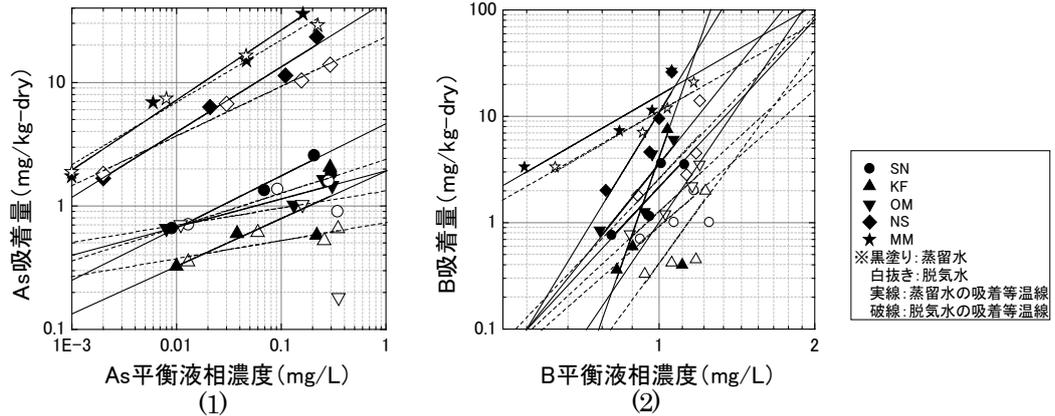


図-2 平衡液相濃度と吸着量との関係

いて、「吸着層」をキーワードに8件を抽出し、文献調査に用いた。

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。

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。

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

3.1.2 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-2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-2)の定数k、nおよびその決定係数R²を表-5に示す。図-2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、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。

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-3に示す。図-3より、蒸留水溶液のKdと比較して、脱気水溶液のKd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。

吸着試験後のEhと吸着量との関係を図-4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 mg/kg-dryから3.53 mg/kg-dry、NSで26.2 mg/kg-dryから14.1 mg/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-5

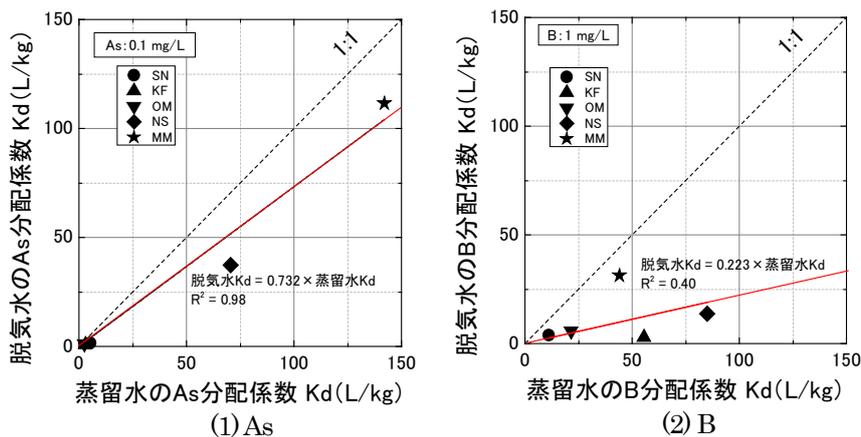


図-3 蒸留水溶液の分配係数と脱気水溶液の分配係数との関係

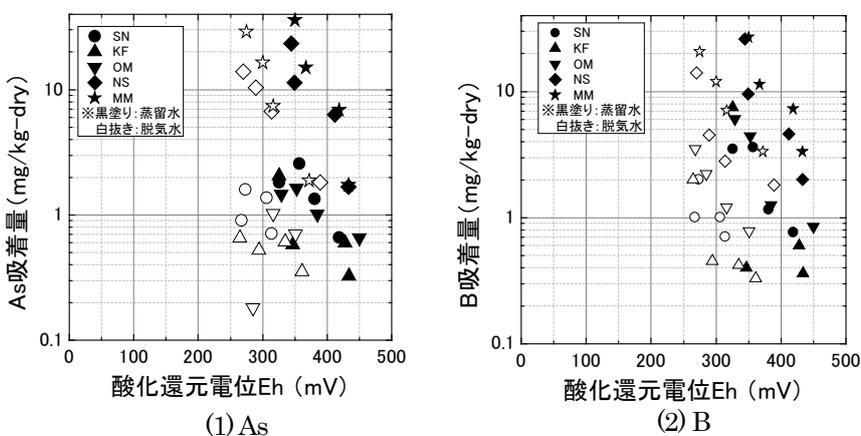


図-4 吸着試験後の Eh と吸着量との関係

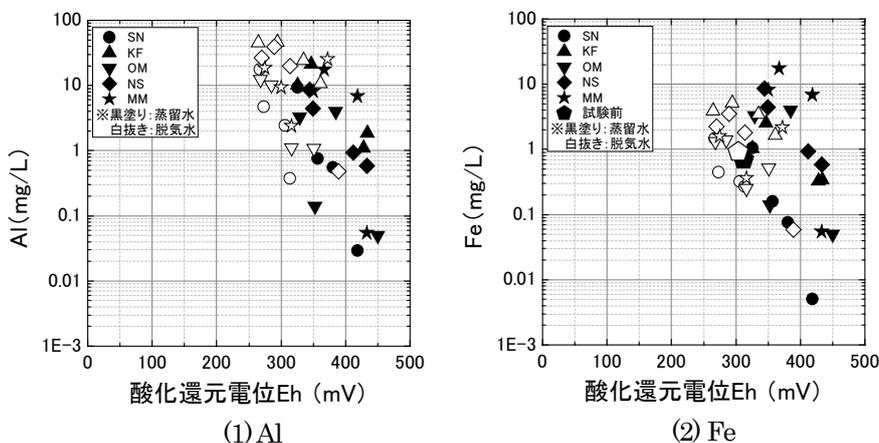


図-5 吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係

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

吸着試験後の Eh と吸着量との関係を図-6 に示す。蒸

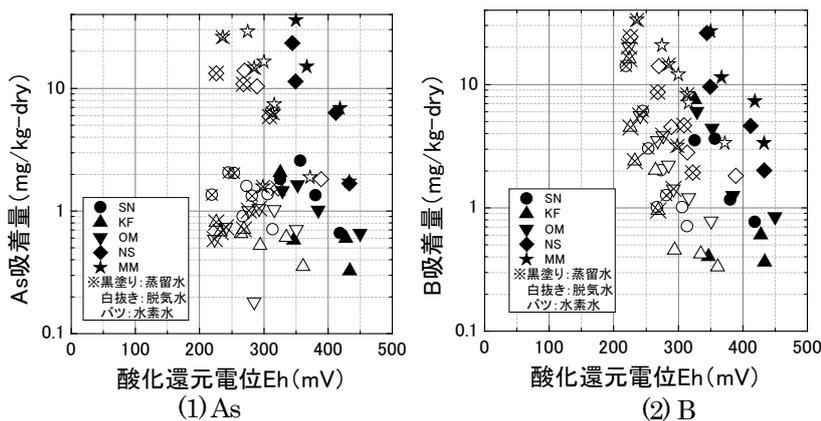


図-6 吸着試験後の Eh と吸着量との関係

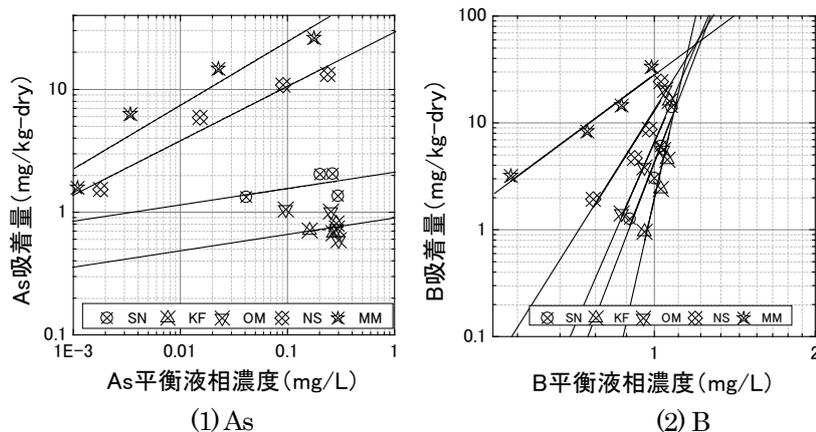


図-7 平衡液相濃度と吸着量との関係

留水溶液の Eh は 326 ~450 mV を示し、脱気水溶液の 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-7 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-8) の定数 k、n およびその決定係数 R² を表-5 に示す。図-8 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, 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

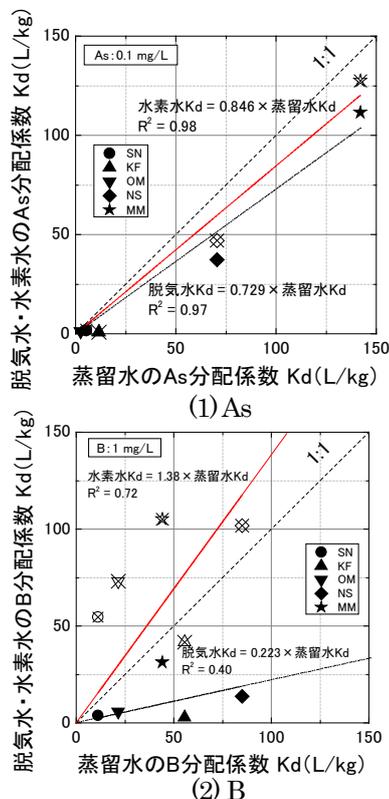


図-8 蒸留水溶液の分配係数と脱気水・水素水溶液の分配係数との関係

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

との関係を図-8 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 および図-10~12 に示す。

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		
								②	溶出試 験 + 中和材 0.1g	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

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 0.1 g) 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 0.1 g 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-10 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 0.1 g (固液比 0.01) 以上の添加ではほぼ平衡に達した。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。したがって、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剤資材には、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-9 および図-11 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

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-9および図-12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

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にと吸着剤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、0.45μm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

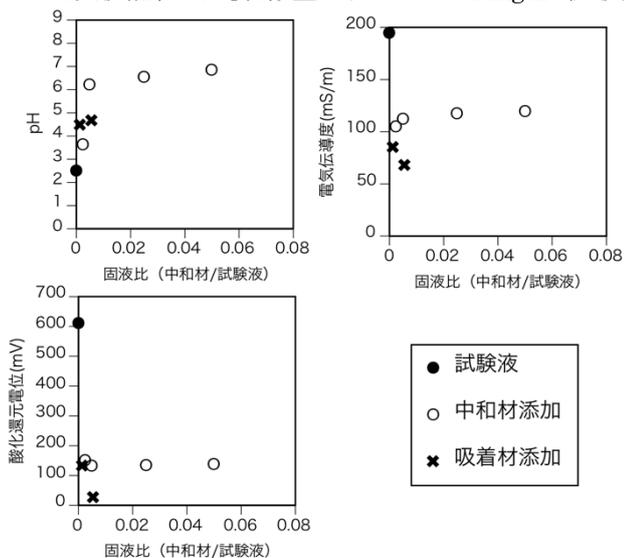


図-9 中和剤・吸着剤添加試験のpH、EC、ORP測定結果

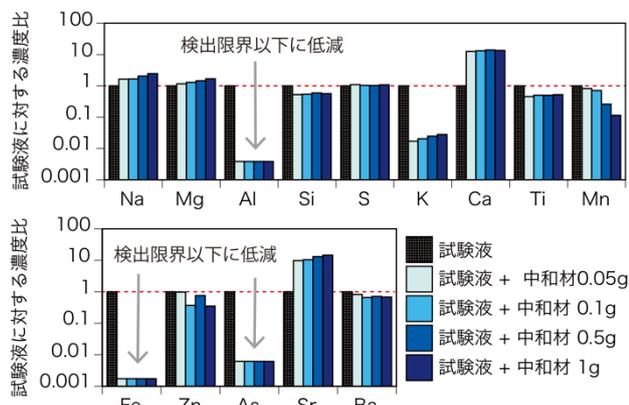


図-10 炭酸カルシウムを用いた中和剤の中和試験結果

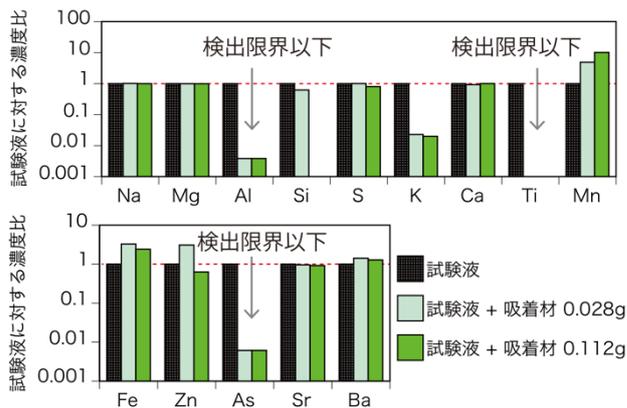


図-11 鉄系吸着剤の吸着試験結果

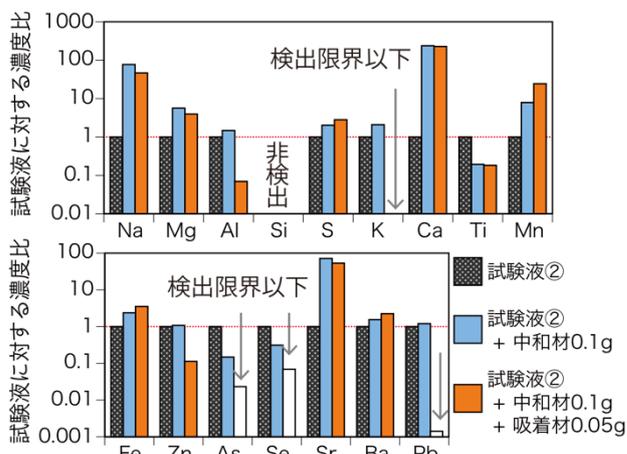


図-12 中和剤・吸着剤の同時使用時の吸着実験結果

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。

4) 脱気水を用いた多段カラム試験による中和・吸着性能評価法の検討結果

蒸留水および脱気蒸留水を用いた上向流多段カラム試験の結果を図-13 に示す。溶媒中の酸素濃度の差(蒸留水: 7.3 mg/L、脱気蒸留水: 0.9 mg/L)により、pH、EC、ORP などの液性、各元素の溶出傾向に有意な差が検出された。脱気水を用いると初期の溶出量(低固液比)では、pH が低くなり、それに応じてヒ素や鉄などの元素溶出量が増加する傾向が認められた。その後、通水量の増加に伴って、元素溶出量は有酸素の脱気水条件よりも低減する傾向に移行する。さらに通水量が増加すると、試料の酸化に敏感な Fe・Mn などの元素の溶出がより増加する傾向へと変化した。この元素溶出傾向の差は、1 段のカラム試験でも同様に確認される現象である。このように、溶媒中の酸素濃度の差により、初期および中期的な元素溶出傾向に変化が生じることが実証された。また、2 段目のカラムによる中和反応は試験終了時まで持続しており、単独のカラム試験に対して pH が 1~1.5 程度の緩衝反応が安定的に継続している。

中和・吸着性能の評価としては、ヒ素の吸着性能は、液個比 4 程度から吸着効果がほとんど認められなくなった。これは、低 pH 環境では中和材の溶解が進み、溶出したカルシウムイオンが、試料由来の硫黄、鉄イオンと反応し晶出した鉄水酸化物あるいは石膏に、ヒ素イオンが吸着あるいは共沈することで、重金属(ヒ素)の吸着性能を発揮し、pH の上昇に伴いカルシウムイオンの溶出が減ることで新たな吸着・共沈が阻害されたためと解釈される。また、溶媒の酸素濃度の差に伴い、鉄の溶出量は、液個比 4 から試験終了時まで顕著な差分を示すが、この差分は反応カラム内での鉄イオンの酸化反応による沈殿物の形成が阻害された結果と解釈できる。

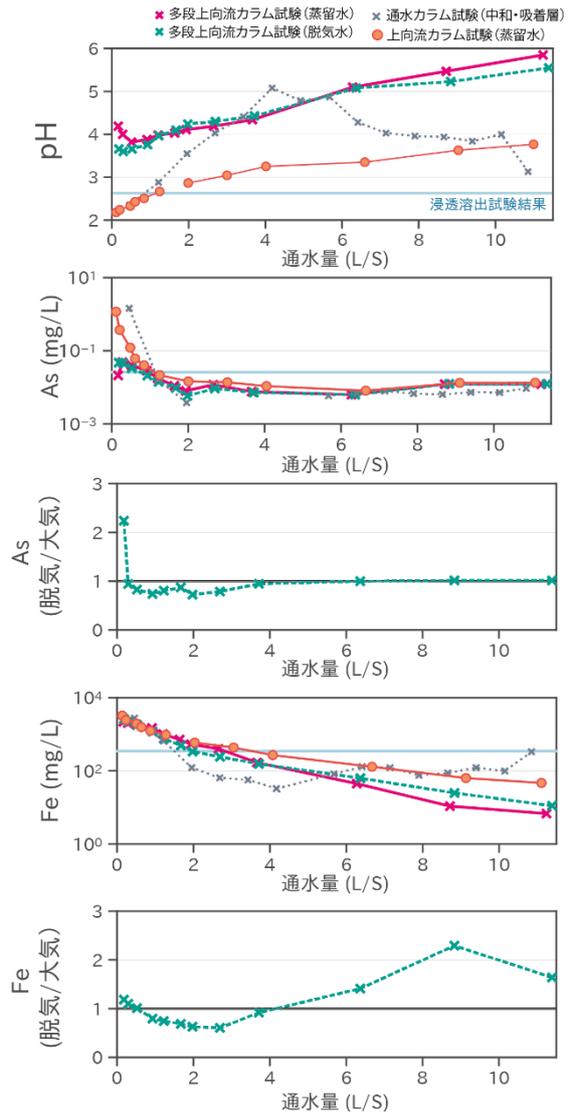


図-13 上向流多段カラム方式による中和・吸着試験結果

この試験結果から、脱気水を用いた多段カラム試験により、盛土深部の貧酸素環境を再現した中和・吸着資材の性能評価法としての適応可能性が示された。今後は、多様な地質材料および資材種別を対象に、本手法の有効性の検討を続ける。

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、浸透の不均衡(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、浸透の不均衡が起こり、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。

浸透の不均衡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-14)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(2015)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-14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-15および図-16のような構造を想定して解析メッシュを作成した。図-15は底面が水平、図-16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張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)

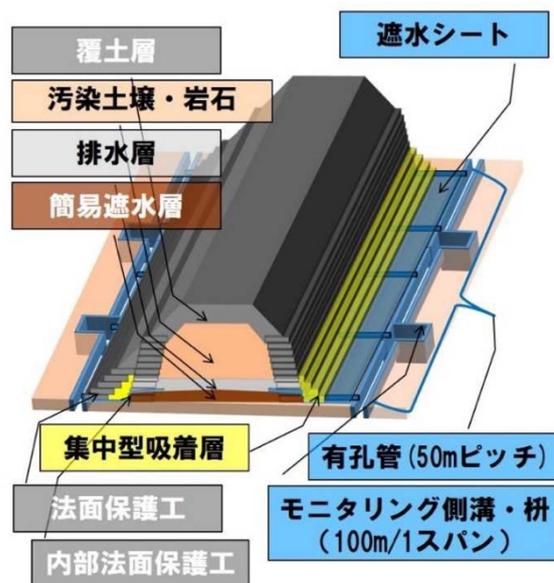


図-14 吸着層工法の盛土構造(案)⁸⁾

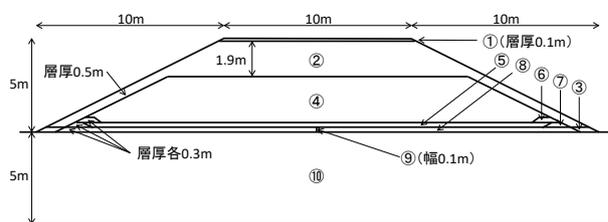


図-15 吸着層断面図(盛土1: 底面が水平な場合)

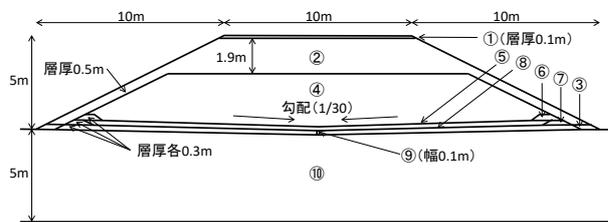


図-16 吸着層断面図(盛土2: 中心部が沈下した場合)

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	掘削すり								
⑤	底部吸着層				掘削すり				
⑥	側部吸着層		掘削すり						
⑦	底部吸着層			側部吸着層		掘削すり			
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								

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 250 mV 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) 現場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) 脱気水を用いた多段式の上向流カラム試験を実施し、盛土内の低酸素環境下における中和・吸着材の性能評価法として適応できる可能性が示された。今後は多種の試料・資材における実験結果の蓄積が必要である。
- 4) 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。
- 5) 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・低負荷型土壌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