

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～33 年度

プログラムリーダー：材料資源研究グループ長 渡辺博志

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、平成 30 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

再生骨材のコンクリートへの利用が、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、今回の実験結果では、再生骨材コンクリートが普通コンクリートに比較して、ASR による膨張が大きくなる傾向は確認できなかった。塩分環境下での耐凍害性については、再生粗骨材を用いた影響はスケーリング初期の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。また、再生骨材の混合使用が、コンクリートの圧縮強度、静弾性係

数および乾燥収縮へ与える影響を明らかにした。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返し再生による影響を把握については、室内において組成の異なる再生用添加剤を用いてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し実施し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。その結果、アスファルトを繰返し再生することによって、再生用添加剤の成分により再生アスファルトの軟化点の上昇傾向や飽和分・芳香族分の成分組成に顕著な差が現れることがわかった。また、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としての適用性について検証を行った。

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、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。このため、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連続溶出試験を実施し、酸化還元電位を変化させたヒ素・ホウ素の溶出傾向の分析とともに、より還元的な環境を再現するため水素水を用いた連続溶出試験を開発・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の結果を得た。また、水素水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など知見を得た。さらに、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、蒸留水を用いた溶出操作の異なる繰返し溶出試験の実施によるヒ素の溶出傾向の分析、岩石からの長期的な重金属等の溶出を把握する試験である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の分析も実施した。

建設発生土の利用技術としては、元素の違いによる発生土のタイプや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、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。

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
WATANABE Hiroshi

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

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

In 2018, we conducted the research on the influence upon ASR resistance performance and freezing and thawing resistance performance of recycled aggregate concrete, performance evaluation of asphalt mixture with increasing repletion of recycling. We also evaluated the amount of asphalt fume during producing asphalt mixture that may affect workers. Reliable evaluation and utilization methods of construction waste soil containing heavy metal derived from natural were studied as the countermeasures to improve environmental safety.

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

9.1 適材適所のリサイクル材等利用技術の構築

9.1.1 リサイクル材料のコンクリート用骨材への利用技術の開発

担当チーム：材料資源研究グループ、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：古賀裕久、安中新太郎、片平博、吉田行、清野昌貴、野々村佳哲

【要旨】

再生骨材コンクリートの普及に向けた技術的課題について整理し、その解決策を提案すべく検討を行っている。平成 28~30 年度は、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の観点から検討した。また、再生骨材と普通骨材との混合使用や再生細骨材の品質管理方法について検討した。この結果、ASR のリスクは普通コンクリートと大きくは変わらない可能性があること、品質が確認された再生粗骨材のみの利用であれば塩分環境下でも必要な耐久性を確保できる可能性があること、圧縮強度、弾性係数、乾燥収縮等への影響程度は再生骨材の混合割合に概ね比例すること、などが分かった。

キーワード：再生骨材、アルカリ骨材反応、密度および吸水率試験、スケーリング、乾燥収縮、混合使用

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、利用用途の大半は路盤材である。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 が平成 17~19 年に制定された。また、国土交通省においても平成 28 年 3 月に「コンクリート副産物の再利用に関する用途別品質基準」が通知され、再生骨材コンクリートの普及に向けた環境整備が進みつつある。

しかしながら、現状のアルカリ骨材反応（以下、ASR）抑制対策が煩雑である、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、コンクリートの乾燥収縮が大きくなる等の課題がある。また、再生骨材を普通骨材に混合して使用した場合の影響や、再生細骨材の利用について情報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課題の目的である。

本研究は材料資源研究グループ（つくば）と耐寒材料

チーム（寒地）とで表-1 に示すような分担で研究を進めている。なお、塩分環境下の耐凍害性に関する研究については、平成 30 年 3 月に、東北地方整備局と共同研究を締結することで、研究成果の現場への適用も睨み、研究を進めている。

表-1 研究課題と分担

課題	H28	H29	H30	主な担当、特筆事項
ASR対策	○	○	○	材料資源研究G
塩分環境下の耐凍害性	○		○	材料資源研究G、耐寒材料T、H30.3に東北地方整備局と共同研究を締結
乾燥収縮	○	○	○	耐寒材料T
普通骨材との混合使用		○	○	耐寒材料T
再生細骨材の品質試験		○		材料資源研究G

2. 再生骨材コンクリート ASR 抑制対策の検討

2.1 現状の課題

普通コンクリートの ASR 抑制対策としては、次の 3 つの方法のいずれかが適用されている。

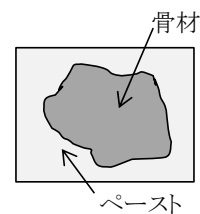
- (1) コンクリート中の全アルカリ量を 3kg/m^3 以下にする
- (2) 抑制効果のある混合セメント（高炉セメント B 種、フライアッシュセメント B 種）等を用いる
- (3) 安全と認められる骨材を用いる

ASR は、コンクリート中の細孔溶液の水酸化物イオン

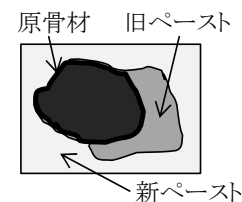
表-2 再生骨材コンクリートのASR抑制対策

再生H	1	コンクリート中のアルカリ総量が $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下
	2	混合セメント(高炉スラグ40%以上)を使用
再生M	1	コンクリート中のアルカリ総量が $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下
	2	混合セメント(高炉スラグ40%以上)を使用し、アルカリ総量 $3.5\text{kg}/\text{m}^3$ 以下
	3	混合セメント(高炉スラグ50%以上)を使用し、アルカリ総量 $4.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下
	4	混合セメントを使用し、かつセメント量の上限を規制 粗骨材のみに再生骨材を用いる場合 4.1 混合セメント(高炉スラグ40%以上)を用い、セメント量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 以下 4.2 混合セメント(高炉スラグ50%以上)を用い、セメント量 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 以下 粗骨材と細骨材に再生骨材を用いる場合 4.3 混合セメント(高炉スラグ50%以上)を用い、セメント量 $350\text{kg}/\text{m}^3$ 以下
再生L		混合セメント(高炉スラグ40%以上)を使用

注：表中の「高炉スラグ40%以上」は「フライアッシュ15%以上」
「高炉スラグ50%以上」は「フライアッシュ20%以上」でも良い



(1) 普通コンクリート



(2) 再生骨材コンクリート

図-1 普通コンクリートと再生骨材コンクリート

濃度が高い (pH が大きい) 場合に生じやすい。細孔溶液の pH を大きくする要因としては、セメントに起因するアルカリ量の影響が大きい。ASR によるコンクリートの劣化が問題視された後、普通ポルトランドセメント中のアルカリ量は低減化が計られ、現在の JIS では 0.75%以下と規定されている。このため、コンクリート中の単位セメント量が $400\text{kg}/\text{m}^3$ を超えない範囲では、(1)の抑制対策が取られていることになる。さらに、混合セメントを使用する方法は、高炉スラグやフライアッシュの硬化時の反応によって細孔溶液の pH が低下し、高い抑制効果を発揮する。土木構造物の場合には、一般に(1)または(2)の抑制対策が実施されている。

一方、再生骨材コンクリートの場合、まず、原料となるコンクリート解体材は、一般に不特定多数の解体現場から搬入されるため、原骨材の全てを特定して(3)の対策をとるには多大な確認作業が必要となる。次に、図-1に示すように、再生骨材は原骨材とそれに付着した旧ペースト (またはモルタル) で構成されるので、この旧ペースト中のアルカリの影響をどう考慮するかが課題となる。

表-2は現在の再生骨材のJISに示されているASR抑制対策の一覧である。再生骨材Hは、付着する旧ペーストの大部分をそぎ落として、ほぼ原骨材のみを取り出すことから、普通骨材と同様の抑制対策となっている。また、再生骨材コンクリートLは、構造物には使用しないことから、利便性を考慮して混合セメントを使用すれば良いとされている。

構造物に用いる可能性のある再生骨材コンクリート

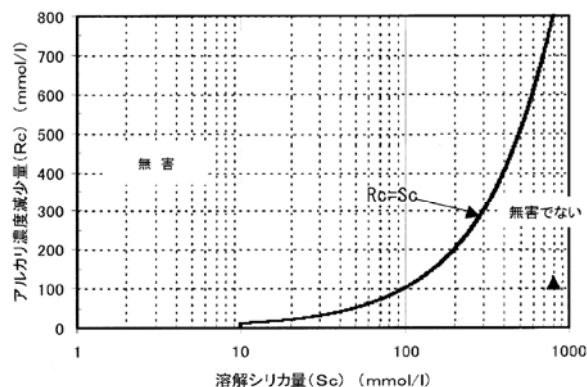


図-2 原骨材のASR反応試験結果(化学法)
(文献1)のデータを一部修正)

Mでは、旧ペースト中のアルカリ量を加算して再生骨材コンクリート中のアルカリ量を計算することとしているため、表-2に示すように複雑なものとなっている。しかしながら、旧ペースト中のアルカリの影響については、必ずしも十分な検証データがあるとは言えない。そこで、図-1に示す旧ペースト中のアルカリの存在が、再生骨材コンクリートのASR反応に与える影響に関して検証実験を行った。

2.2 実験方法

実験には13年前に製造されたコンクリート塊を用いた。このコンクリートには、粗骨材、細骨材ともに北海道産のASR反応性を有する骨材が用いられている。原骨材のアルカリシリカ反応試験(化学法)の結果を図-2に示す。

原コンクリートの配合を表-3に示す。コンクリートは

表-3 原コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	アルカリ量 NaOH当量 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
20	55	46	176	320	839	989	12±1	4.5±1	6

表-4 骨材の品質

		絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
反応性再生骨材	粗骨材	2.23	7.39
	細骨材	1.92	14.80
反応性原骨材	粗骨材	2.56	2.84
	細骨材	2.10	11.11
石灰石骨材	粗骨材	2.68	0.64
	細骨材	2.64	1.45

約 10 リットルのポリバケツに打ち込まれ、硬化後、12 年間、屋内で保管されていた。コンクリートには ASR によると考えられるひび割れが多数発生していた。

この原コンクリートを破碎し、再生骨材 M に相当する骨材と可能な限り旧ペーストを除去した反応性原骨材を製造した。まず、原コンクリートをジョークラッシャーで 1 次破碎し、その後、コーンクラッシャーで 2 次破碎して再生骨材 M を製造した。この再生骨材 M の一部をさらにロッドミルに投入して反応性原骨材を製造した。なお、ロッドミルは細骨材を製造する機械であり、本来の使用方法では破碎エネルギーが大きすぎるため、通常のロッドを φ32mm の異形鉄筋に替えて、破碎エネルギーを調整した。ただし、反応性原骨材でも、原コンクリート由来のペーストを完全に除去できたわけではなく、多少は付着した状態であった。できあがった再生骨材および反応性原骨材の品質を表-4 に、外観を写真-1 に示す。

この再生骨材と原骨材を用いて同一の配合でコンクリートを製造し、促進環境において ASR 反応性を比較することで、再生骨材中の旧ペーストの影響を把握した(表-5)。コンクリートの配合としては、粗骨材最大寸法 G_{max}20mm、水セメント比 W/C55%、細骨材率 s/a46%、単位セメント量 336kg/m³、単位水量 185kg/m³、目標空気量 2%とした。比較のため反応性を有しない石灰石骨材(表-4) も用いた。

ASR の促進膨張試験はコンクリート工学会の「コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法 JCI-AAR-3」を参考に行った。この試験方法ではコンクリート中のアルカリ総量を 5.5kg/m³ に調整することが示されている。本試験の反応性を有する骨材が含まれる配



写真-1 再生骨材と原骨材

表-5 ASR 促進試験の配合組合せ

シリーズ1				シリーズ2			
記号	セメント	細骨材	粗骨材	No.	セメント	細骨材	粗骨材
NIL	NC	○	○				
NIA	NC	○	●	NIR	NC	○	▲
NaL	NC	●	○	NrL	NC	▲	○
NaA	NC	●	●	NrR	NC	▲	▲
B4IA	BB (40%)	○	●	B4IR	BB (40%)	○	▲
B4aA	BB (40%)	●	●	B4rR	BB (40%)	▲	▲
B5aA	BC (50%)	●	●	B5rR	BC (50%)	▲	▲

○:石灰石骨材、●:反応性原骨材、▲:反応性再生骨材

合で最もアルカリ量が少ない配合は表-5 中の NIA の配合であり、コンクリート中の推定アルカリ量は Na₂O 当量で 2.8kg/m³ (うち、セメント由来が 1.9kg/m³、原骨材に付着したペースト分由来が 0.9kg/m³) であった。このた

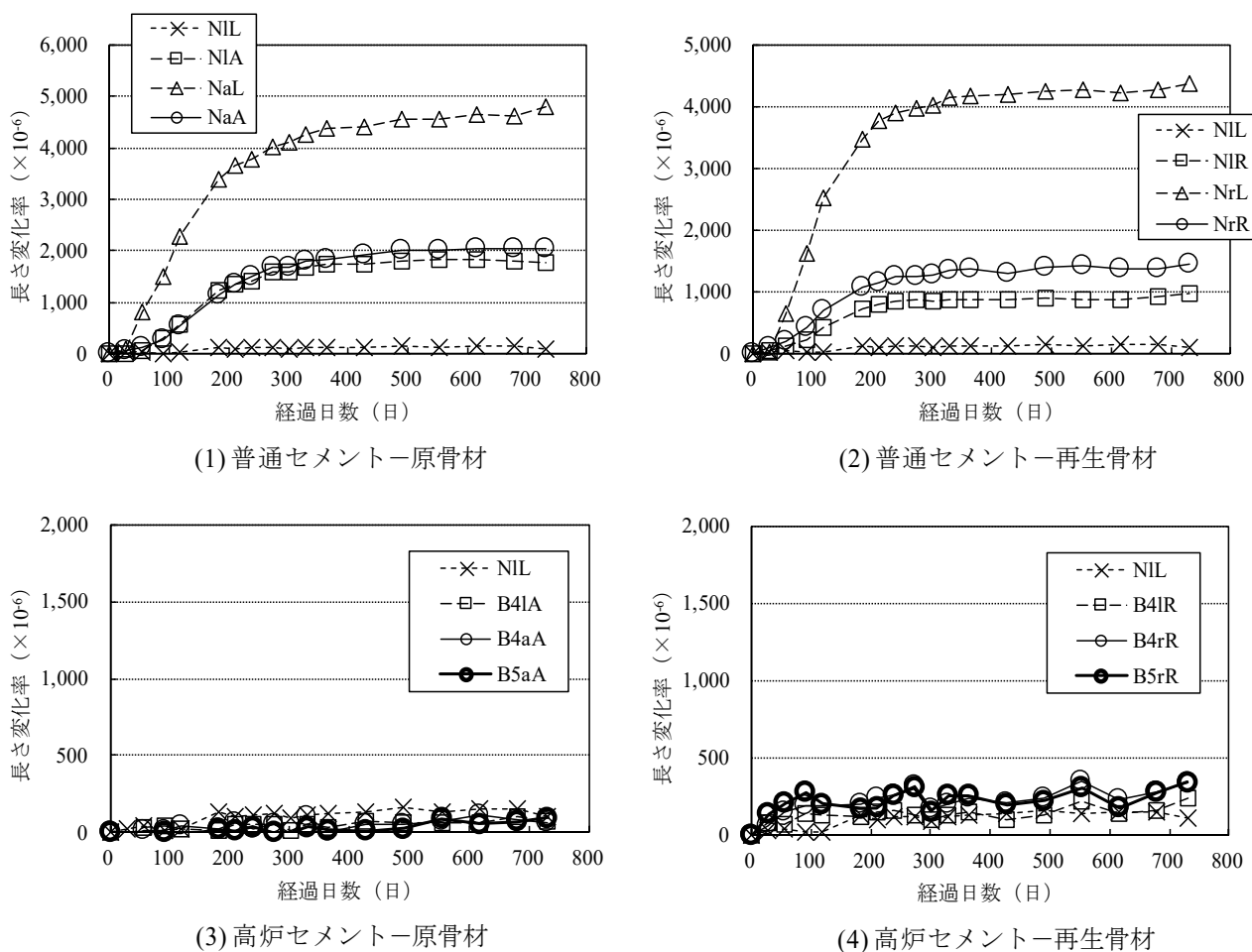


図-3 長さ変化測定結果

め、 Na_2O 当量で 2.7kg/m^3 となるよう水酸化ナトリウムを添加した。なお、新たなペースト中のアルカリ濃度を統一する観点から全ての配合で添加するアルカリの量は同一とした。

表-5 の組み合わせでコンクリートを練り混ぜ、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を2本ずつ作製し、打ち込みから2日後に脱枠した。その後、直ちに長さ変化の初期値を測定し、保水紙とポリエチレン製袋で包んで、 40°C の恒温槽に保管した。

平成28年度にコンクリート供試体の製造を行い、平成29～30年度にかけて供試体の長さ変化を測定した。

2.3 実験結果

長さ変化の試験結果を図-3に示す。

普通セメントと反応性原骨材の組み合わせが図-3中の(1)であり、細骨材にだけ反応性骨材を使用したケースで最も大きな膨張を示し、粗骨材のみ、または細骨材と粗骨材の双方に反応性骨材を使用したケースはほぼ同等の膨張量となった。図-3の(2)は(1)と同様の条件で反応

性原骨材を反応性再生骨材に置き換えたケースであるが、膨張量は(1)とほぼ等しく、再生骨材中の旧ペースト内のアルカリ量によって膨張量が大きくなることは無かった。

図-3の(3)と(4)は、高炉セメントを使用したケースであり、いずれのケースでも大きな膨張は見られなかった。

以上のように、再生骨材コンクリートが普通コンクリートに比較して、ASRによる膨張が大きくなる傾向は確認できなかった。

3. 塩分環境下の耐凍害性の検討

3.1 現状の問題点

凍結防止剤散布地域等で塩分の影響を受ける環境下においては凍害の一種であるスケーリング劣化が促進されることが、近年、課題となっている。スケーリングについては、普通骨材を用いた場合についても必ずしも十分な知見が確立されていないが、再生骨材を用いた場合についてはさらに知見が無いのが現状で、「コンクリート副

表-6 再生粗骨材の品質

記号	絶乾密度	吸水率	ランク
KB	2.46	3.00	M
PC	2.45	3.57	M
T1	2.44	4.06	M
T2	2.27	5.60	L
HM	2.29	5.68	L
K2	2.31	6.01	L
K1	2.30	6.38	L
TI	2.26	6.63	L
MM	2.18	8.10	L外
Cont	2.69	0.50	砕石

産物の再生利用に関する用途別品質基準」(国土交通省通知、平成28年3月)では、塩害地域や凍結防止剤散布箇所は再生骨材コンクリートの標準的な使用範囲に含まれていない。

しかし、散布量が少量の地域も含めると、我が国では凍結防止剤の散布地域は広く、このことが再生骨材コンクリート普及の妨げになる可能性がある。一方、東北地方整備局ではプレキャストコンクリート製品に再生粗骨材を使用するための検討が進められてきた。そこで、土研は平成30年3月、東北地方整備局とプレキャストコンクリート製品に再生粗骨材を使用するための共同研究を締結した。

この共同研究の一環として、塩分環境下における再生骨材コンクリートの耐凍害性(内部劣化およびスケーリング劣化に対する抵抗性)について検討した。

3.2 実験方法

再生骨材コンクリートの製造において、再生粗骨材としてJIS規格の再生骨材M~Lに概ね相当する9種類の骨材(表-6)を用いた。また、比較用に良質な砕石(硬質砂岩、表中のCont)も用いた。粗骨材最大寸法は20mm(T1のみ15mm)とした。細骨材には良質な川砂(絶乾密度2.53g/cm³、吸水率1.60%)を用い、普通ポルトランドセメント、AE減水剤、AE助剤を用いた。

コンクリートの配合はW/C55%、s/a45%のAEコンクリートとした。練上りのスランプは8~14cmの範囲、空気量は4.5~5.5%の範囲であった。供試体は100×100×400mmの角柱とし、打込みの翌日に脱枠し、材齢28日まで20℃の水中養生とした。

凍結融解試験は、JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法のA法(水中凍結融解試験方法)に準じて実施した。JIS A 1148では、コンクリート供試体を入れるゴム容器内を水で満たして試験を行う(以下、淡水の試験という)が、これとは別に3%NaCl水溶液で満たして塩分環境下の凍結融解の条件を模した試験(以下、塩水の試験という)

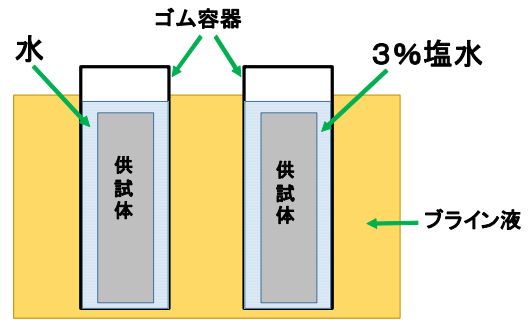


図-4 凍結融解試験の概要

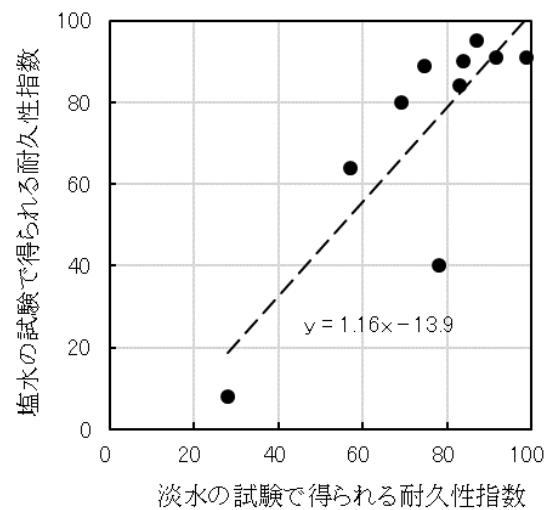


図-5 耐久性指数の比較

を行った(図-4)。

供試体本数は条件ごとに2本とした。試験は300サイクルまで実施し、数~数十サイクルごとに供試体を取り出し、たわみ振動による一次共鳴振動数と質量を測定した。一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算出して耐久性指数に換算し、これを内部劣化の指標とした。質量の試験開始時点からの減少率を求め、これをスケーリング劣化の指標とした。

なお既往の研究²⁾で、塩水を用いた場合でも、供試体が顕著に劣化するまでは、凍結融解試験中のゴム容器内の水温や供試体の中心温度の履歴は、淡水を用いた場合と同等であることを確認している。

3.3 実験結果

内部劣化の指標とした耐久性指数について、淡水の試験と塩水の試験を比較した結果を図-5に示す。耐久性指数は淡水の試験と塩水の試験とで概ね同程度の値となり、塩分環境下であっても内部劣化の進行は一般環境下と概ね同程度と考えられる。

スケーリング劣化の指標とした質量減少率について、淡

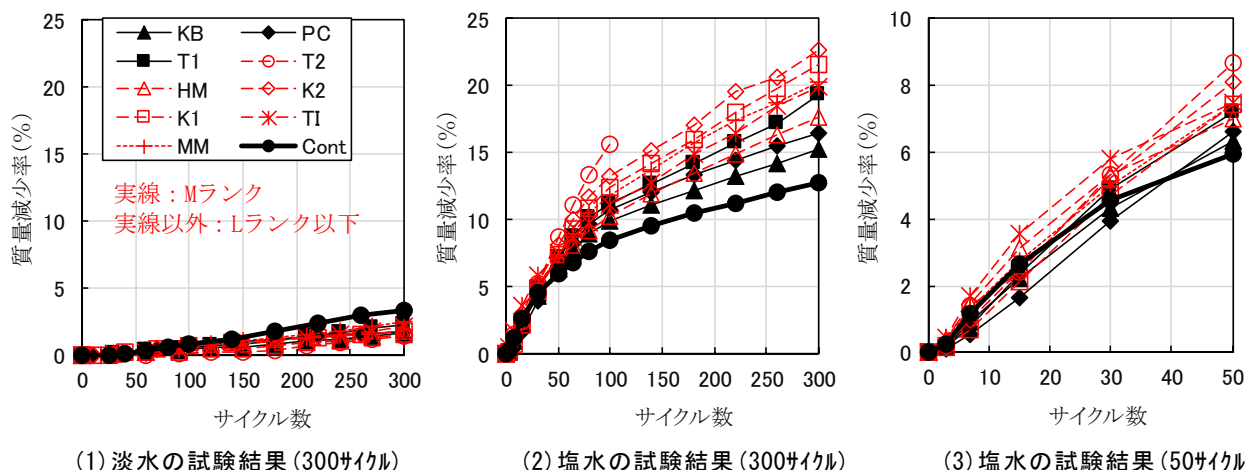


図-6 質量減少率の比較

水の試験結果を図-6(1)に示す。いずれの配合でも質量減少率は2～3%程度と小さく、再生粗骨材の影響は見られなかった。これに対して塩水の試験結果は図-6(2)に示すように、質量減少率は全体的に大きく、また、碎石 (Cont) を用いた場合と比較して再生粗骨材を使用した配合の質量減少率は大きくなった。しかし、50 サイクルまでの試験結果 (図-6(3)) に着目すると、質量減少率が6% (写真-2 参照) 程度までの範囲であれば、粗骨材の違いによる質量減少率の差は小さく、特に再生粗骨材 M に相当する品質であれば普通骨材と遜色無い結果であった。

すなわち、再生粗骨材を用いた影響はスケーリング初期の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。したがって、表面付近のモルタルのスケーリング速度が大きくなるように適切な配合設計を行うことで、再生粗骨材の有効利用が可能であると考えられる。

4. 再生骨材の乾燥収縮対策手法に関する検討

4.1 研究概要

再生骨材は、骨材中に含まれるコンクリートの旧モルタル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懸念される。

平成 28～29 年度は、再生粗骨材 M, L を用いたコンクリートにより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、質量減少率がともに増大

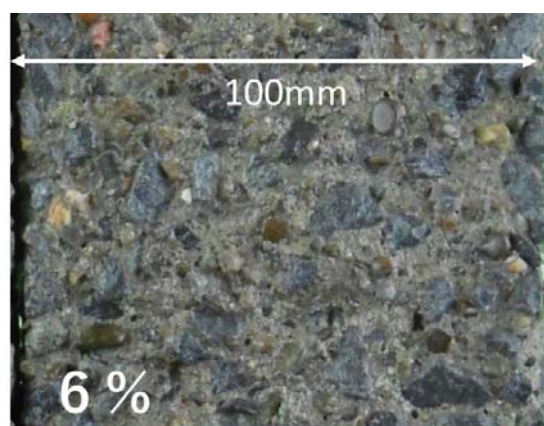


写真-2 質量減少率6%の状態

することや、旧モルタル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。

平成 30 年度は、さらに、再生細骨材について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。

4.2 文献調査概要

文献調査は、コンクリート工学年次論文報告集のうち、6ヶ月収縮量、配合表、骨材情報が記載されていた16文献を対象とした。また、文献で報告されている試験ケースのうち、セメント種類が普通ポルトランドセメント、再生骨材のランクがH, M, Lの結果を対象とした。また、収縮低減剤や膨張材を用いた試験ケースについては整理対象から除外した。その結果、整理対象となる試験データ数は136データで、その範囲は、水セメント比30～65%、単位水量107～195 kg/m³、28日強度25～84 N/mm²、再生細骨材の絶対密度1.97～2.52、吸水率2.09

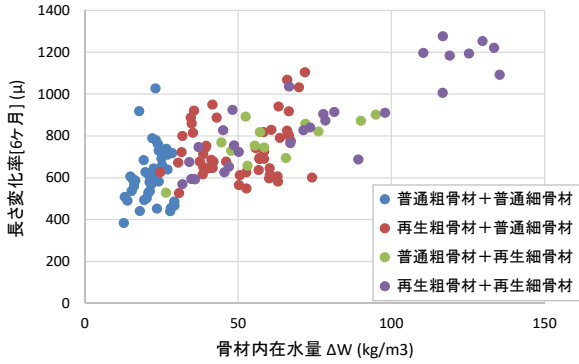


図-7 骨材の組合せと乾燥収縮

～13.0%, 再生粗骨材の絶乾密度 2.29～2.64, 吸水率 1.07～6.66%であった。

4.3 調査結果

図-7に6ヶ月経過時点の乾燥収縮と骨材内在水量との関係を示す。ここで、骨材内在水量ΔW は、下式で算定される表乾状態の骨材が含有する水分の単位体積質量である。

$$\Delta W = \rho_G G / (1 + \rho_G) + \rho_S S / (1 + \rho_S)$$

ここで、 ρ_G :粗骨材の吸水率(%), G :単位粗骨材量(kg/m³), ρ_S :細骨材の吸水率(%), S :単位粗細材量(kg/m³)である。一般に、旧モルタル分が多い再生骨材ほど吸水率が大きくなることから、骨材内在水量ΔW が多い再生骨材コンクリートは、旧モルタル分を多く含むコンクリートであると言える。

図-7を見ると、骨材内在水量ΔW が多くなるほど、乾燥収縮が大きくなっており、吸水率試験などを指標として把握できる旧モルタル分の多寡が乾燥収縮の大小に大きく影響することがわかる。

5. 混合使用した際の影響に関する検討

5.1 研究概要

平成 30 年の JIS 改正に伴い、再生骨材 L と普通骨材を混合し吸水率などの規定を満足することで、再生骨材 M を用いたコンクリートを製造できるようになった。また、欧州規格などの海外基準等では、再生骨材と普通骨材を混合使用することを前提とした規定がなされている場合もある。しかし、我が国の再生骨材再生骨材 L と普通骨材を混合して使用した際の品質への影響については必ずしも十分には明らかになっていない。平成 29～30 年度は、混合使用時の品質変動を把握することを目的として、L 相当の再生粗骨材と普通粗骨材(安山岩、石灰石岩)とを混合使用し、圧縮強度や、静弾性係数、乾燥収縮、塩分浸透抵抗性などを調査した。

5.2 使用材料と配合

表-7に使用材料の一覧を示す。普通骨材は安山岩と石灰石骨材の2種類を使用した。また、細骨材は苫小牧市

表-7 使用材料

種別	使用材料
セメント	高炉セメントB種 (密度 3.05 g/cm ³ , 比表面積 3.770 cm ² /g)
粗骨材	普通骨材 (安山岩) 小樽市見晴産砕石 (表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 1.84%, 最大粒径 20mm, 微粒分量 0.9%)
	普通骨材 (石灰石) 函館市義朗産砕石 (表乾密度 2.71 g/cm ³ , 吸水率 0.48%, 最大粒径 20mm, 微粒分量 0.8%)
	再生骨材 石狩産路盤用再生骨材 (表乾密度 2.42 g/cm ³ , 吸水率 6.67%, 最大粒径 20mm, 微粒分量 0.1%)
細骨材	苫小牧市錦多峰産海砂 (表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 1.19%)

表-8 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

No.	セメント	W/C (%)	骨材割合 (%)		s/a (%)	単位量 (k/m ³)			混和剤 (%/C)		スランプ (cm)	空気量 (%)			
			普通	再生		W	C	S	安山岩	石灰石			再生	減水剤	AE剤
1	BB	55	100	0	45.0	154	280	846	1035	-	-	0.24	0.0020	10.0	4.3
2			67	33					691	-	314	0.28	0.0013	10.0	4.3
3			33	67					345	-	627	0.36	0.0010	11.1	4.7
4			100	0					-	1045	-	0.00	0.0031	13.2	4.7
5			67	33					-	697	314	0.08	0.0029	14.0	5.5
6			33	67					-	348	627	0.18	0.0018	13.0	5.1
7			0	100					-	-	941	0.33	0.0010	11.0	5.5
8	BB	40	100	0	41.0	156	390	729	1050	-	-	0.43	0.0022	10.5	5.0
9			67	33					701	-	318	0.50	0.0016	11.2	5.5
10			33	67					350	-	636	0.49	0.0010	10.0	4.9
11			100	0					-	1061	-	0.15	0.0025	11.6	4.6
12			67	33					-	707	318	0.34	0.0015	12.0	4.9
13			33	67					-	354	636	0.42	0.0010	10.3	4.9
14			0	100					-	-	955	0.45	0.0010	8.5	5.4

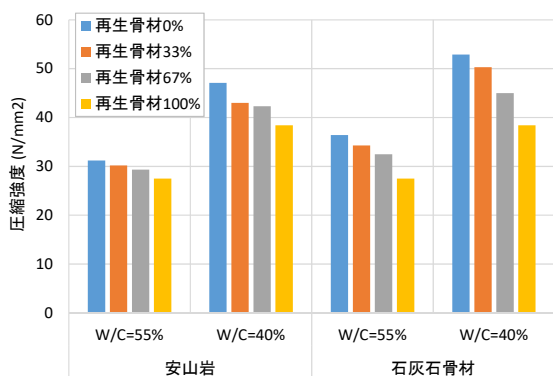


図-8 圧縮強度

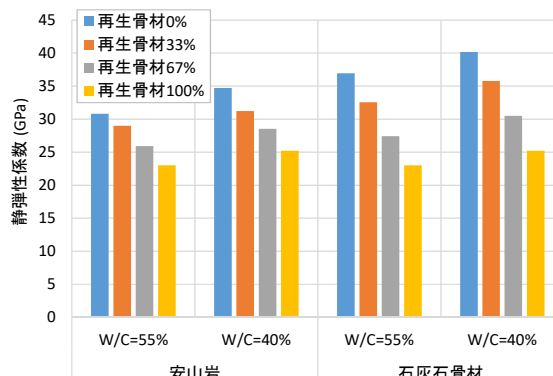


図-9 静弾性係数

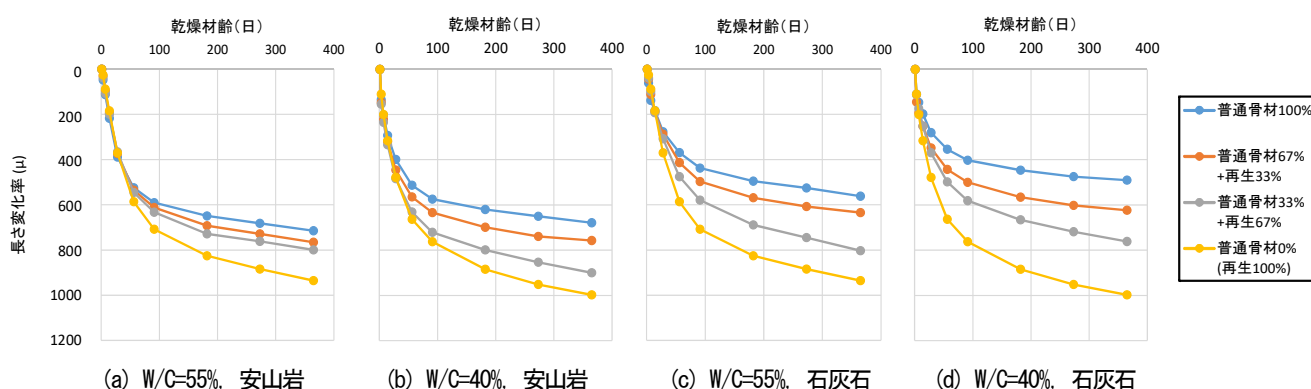


図-10 長さ変化率

錦多峰産の除塩海砂、セメントは高炉セメントB種を使用した。

コンクリートの配合を表-8に示す。水セメント比は40%と55%の2種類とした。また、目標スランプは12±2.5cm、目標空気量は5.0±1.0%とし、混和剤で調整した。

5.3 試験方法

圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠し、φ100×200mmの円柱供試体を作製して材齢7, 28日に実施した。また、JIS A 1149に準拠して静弾性係数も測定している。

乾燥収縮試験は、100×100×400mmの角柱供試体を材齢7日まで水中養生し、その後、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室で乾燥材齢が365日となるまで長さ変化を測定した。長さ変化の測定は、JIS A 1129-1のコンパレータ方法にて実施した。

塩分浸透抵抗性は、石灰石骨材と再生骨材の組合せのみを対象として、JSCE-G 571の電気泳動試験、およびJSCE-G 572の浸漬試験を実施した。浸漬試験については、側面を30分硬化型のエポキシ樹脂でシーリングし

た後、10%塩水に1年間浸漬し、JIS A 1154の電位差滴定法に準拠して全塩化物イオン量を計測した。

なお、各試験のコンクリート供試体は打設翌日に脱型し、試験材齢まで20℃水中養生とした。

5.4 試験結果

5.4.1 圧縮強度試験

図-8に材齢28日における圧縮強度の試験結果を、図-9に静弾性係数の試験結果を示す。L相当の再生骨材の使用量が多くなるほど、圧縮強度と静弾性係数は低下する傾向が見られた。また、その低下の程度は、圧縮強度、静弾性係数ともに、使用割合に対して同様であることから、影響について比例関係を用いて管理できる可能性がある。

5.4.2 乾燥収縮

乾燥収縮試験によって得られた長さ変化率を図-10に示す。いずれの配合でも、乾燥開始14~28日程度の初期段階では骨材による差は見られないものの、時間が経過するにつれて、普通骨材と再生骨材との長さ変化率の増加量に差が生じており、乾燥材齢56日目以降では、全ての配合において、L相当の再生骨材を用いたコンク

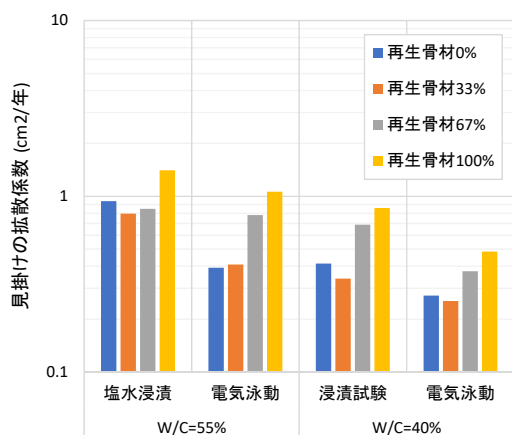


図-11 塩分拡散係数

リートの方が、長さ変化率の増加量が大きくなった。
 また、圧縮強度や静弾性係数と同様に、長さ変化率は再生骨材の使用割合に応じて一様に変化する傾向が見られ、W/C や混合率も同様であった。このことから、再生骨材の使用割合を限定したり、乾燥収縮量の小さい骨材（石灰石等）と混合使用したりすることによって、乾燥収縮増加を制御できる可能性がある。

5.4.3 塩分浸透抵抗性

塩水浸漬試験および電気泳動試験により得られた見掛けの塩分拡散係数を図-11 に示す。なお、どちらの試験も3試料以上での平均を取る事が定められているが、今回図-11 に示す結果は、塩水浸漬試験は1試料のみの値、電気泳動試験は2試料の平均値となっている。

図-11 を見ると、33%程度の少量混合時には、再生骨材の影響はさほど影響が見られなかったが、混合割合をさらに増やすと、再生骨材量の増加に応じて、拡散係数も増大しており、L 相当の低品質な再生骨材が塩分侵入の経路となった可能性がある。一方で、W/C=55%の塩水浸漬試験の結果のように、混合率67%まで再生骨材の影響が明確でないケースもあった。現状では、実験に用いた再生骨材や再生骨材コンクリートの配合が限定されていることから、今後、試験を追加実施するなどにより情報を集積し、再生骨材混合率と塩分浸透抵抗性の関係について、さらに整理を進めていきたい。

6. 再生細骨材の密度および吸水率試験方法の検討

6.1 現状の問題点

コンクリート用細骨材の密度および吸水率試験方法はJIS A 1109 に規定されている。この方法では、細骨材を徐々に乾燥させていく過程で、逐次、フローコーンに詰めて突き固め、フローコーンを引き上げたときに初めて

スランプしたときを表面乾燥飽水状態（以下、表乾という）、その時の含水率を吸水率と判定する（以下、フローコーン法）。

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、再生細骨材のように微粒分の多い細骨材では表乾が正しく判定されない可能性がある。このため、JIS A 5005（コンクリート用碎石砕砂）やJIS A 5023（再生骨材 L を用いたコンクリート）の規定では、JISA 1103（骨材の微粒分量試験）で微粒分を洗い除去した細骨材を対象に、フローコーン法を行っても良いと規定されている。一方でJIS A 5022（再生骨材 M を用いたコンクリート）では、微粒分の多くは骨材よりも密度が小さい硬化セメントペーストであり、これを洗い除去すると残った細骨材の品質が実際よりも良く（危険側）判定されるおそれがあることから、洗い除去は認められていない。そこで、微粒分を洗い除去しない再生細骨材の表乾を、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⁾。この検討は主に平成29年度に実施した。

6.2 実験方法

実験には強度レベルが異なる2種類の原コンクリートから製造した再生細骨材を用いた。表-9 に示す方法で原コンクリートを破砕し、再生細骨材を製造した。なお、破砕したままの状態では2.5-5mm 粒子の割合が多く、標準粒度の範囲に入らないので、2.5-5mm 粒子の1/2 を除去した。なお、0.15mm 以下の微粒分量はいずれも10%程度であった。試験に用いる試料は無作為に約30kg ずつ採取し、その半量はそのまま(N,P) 試料とした。残りの半量は、JISA 1103 によって微粒分を除去し、(NW,PW) 試料とした。

吸水率の測定方法には、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（以下、電気抵抗法という）があり、これらの結果を比較することで、フローコーン法で表乾が正しく測定できているかを確認した。

表-9 再生細骨材の製造方法

記号	原コンクリート	製造方法	粒度調整
N	RC建物 解体コン	インパクトクラッシュによる破砕	2.5-5mm粒子の1/2を除去
P	プレキャスト製品		
NW	上記のNおよびPから、JIS A 1103によって微粒分を除去したもの		
PW			

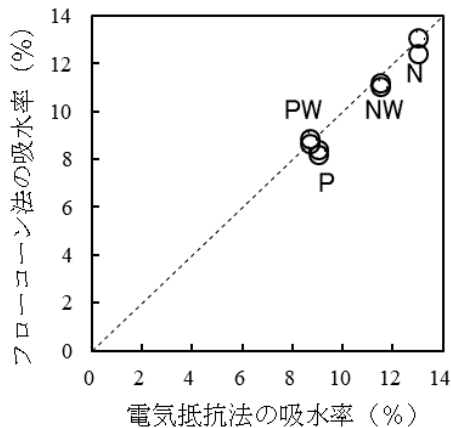


図-12 吸水率の比較

6.3 実験結果

電気抵抗法から得られた吸水率とフローコーン法から得られた吸水率との比較を図-12 に示すが、両者の値は良く一致した。

実験を行う前は、微粒分の影響で、表乾以上に乾燥しても試料がスランプしない場合などが生じ、フローコーン法の結果が大きく変動することを予想したが、フローコーン法を実際に行ったところ、特に測定上の不具合は認められなかった。試料を徐々に乾燥させていく過程で、粒子の細かい微粒分のほうから先に乾燥していく傾向があり、乾燥した微粒分の存在は試料のスランプにあまり影響を与えないものと考えられる。

以上の結果から、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試験を行って良いと考える。

7. まとめ

(1) 再生骨材コンクリートの ASR 抑制対策に関しては、

現状では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が、今回の実験結果では、旧ペースト中のアルカリによって膨張量が大きくなることはなかった。

(2) 塩分環境下における耐凍害性に関して、内部劣化については淡水の条件と遜色ない結果が得られた。スケーリング劣化については、再生粗骨材の品質の影響はスケーリング初期の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。

(3) 再生粗骨材、再生細骨材ともに旧モルタル分の影響により乾燥収縮が大きくなる。また、再生細骨材の方が乾燥収縮に及ぼす影響が大きい。

(4) 再生骨材を混合使用したコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および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。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一つとできる可能性がある。

(5) 再生細骨材の密度および吸水率試験方法について検討した。この結果、微粒分を多く含む再生細骨材であっても、JIS A 1109 のフローコーン法で試験が可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針 (案)、土木学会、2005.6
- 2) 片平博、古賀裕久：振動締固めが凍結融解・スケーリング抵抗性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.38, pp.999-1004, 2016.7
- 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

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）、寺田剛、川上篤史、新田弘之（上席）、川島陽子、丸山記美雄（上席）、金谷元、上野千草

【要旨】

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

平成30年度までに、組成の異なる再生用添加剤を用いてアスファルト混合物の繰返し再生による影響を把握するため、室内においてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。また、積雪寒冷地における再生骨材および再生混合物の性状について、舗装工事箇所より採取した試料に対して評価を行うとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料としての適用性について検証を行った。そ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¹⁾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。

平成30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 試験方法

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

試験手順を図-1 に示す。まず、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を用いて針入度 70 に再生した。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。

以後、同様に劣化と再生を 5 回繰り返した。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。

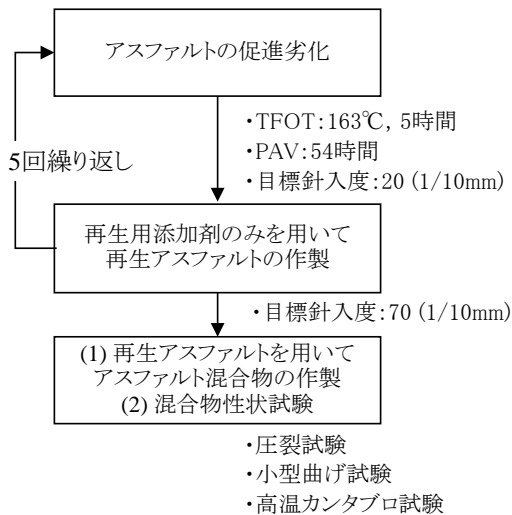


図-1 試験手順（100%再生）

(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%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 80%の再生混合物（以下、80%再生

の試験手順を図-2 に示す。混合物は密粒度混合物(13)とした。再生骨材は、新規混合物を製造したのち熱風循環乾燥炉において劣化させて用いた。劣化時間は針入度 20 になるよう事前に検討し設定した。再生混合物は、再生骨材のアスファルトを抽出・回収して針入度を計測し、目標針入度が 70 になるよう添加剤を加え、20%分の新規骨材の追加および ORG の添加量を調整して作製した。添加剤は、後に示す芳香族分が多い添加剤 A および飽和分が比較的多い C を用いた。この手順を 7 回繰り返した。

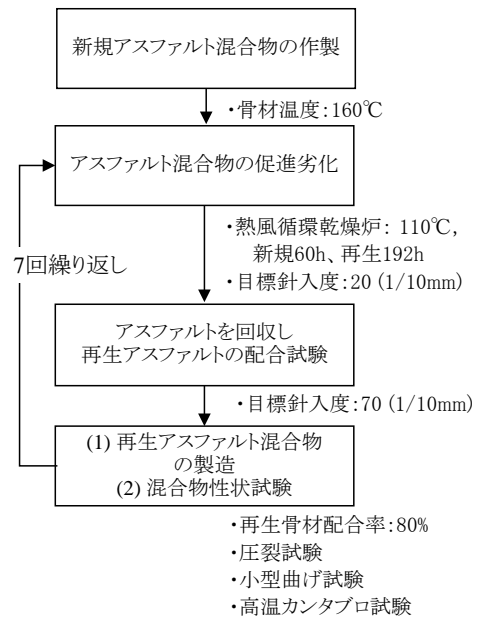


図-2 試験手順（80%再生）

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）規制に対応したものをを用いた。

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。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、20%分の新アスファルトおよび新規骨材を同様の粒度で追加している。よって、粒度はどの再生回数においても同じである。しかし、添加剤の密度が異なるので、再生アスファルトの密度もORGとは異なる。そのため、再生混合物の作製の際には、ORGの最適アスファルト量である5.5%と同じ体積のアスファルト量になるように再生アスファルトの密度から補正して添加した。

表-1 ストレートアスファルト60/80(ORG)の性状

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

表-2 再生用添加剤の性状

		添加剤A	添加剤B	添加剤C	添加剤D	添加剤E
密度(g/cm ³)		0.975	1.013	0.909	0.948	0.863
組成 (%)	アスファルテン分	0.1	0.2	0.0	0.6	0.0
	レジン分	6.1	3.7	2.5	2.1	0.0
	芳香族分	88.1	91.1	47.7	47.4	0.1
	飽和分	5.7	4.9	49.9	49.8	99.9
PCA対応 ⁶⁾		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は以下のように行った。

表-4 試験項目

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 ⁹⁾
	ドライスラッジ量試験	文献4),5)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6)
	高温カンタプロ試験	舗装調査・試験法便覧 B010

(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⁴⁾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-10307-1⁵⁾および既往研究⁴⁾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⁶⁾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) 高温カンタプロ試験

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、カンタプロ試験により評価することにした。カンタプロ試験ではこれまでの研究⁷⁾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

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-3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ていくと、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。

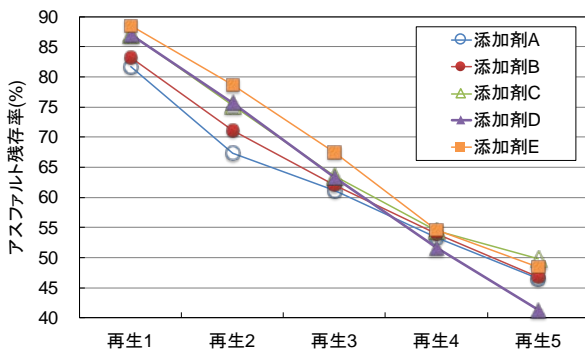


図-3 再生アスファルトのアスファルト残存率

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-4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-5に示す。各添加剤において、アスファルトの劣化・再生回数が増えると軟化点が増加する傾向が見られた。特に、飽和分が多い添加剤C、D、Eで再生したものはA、Bと比較して、劣化3以降に顕著に軟化点が増大した。これより、飽和分が多い添加剤は、軟化点が増大しやすいたことが分かった。芳香族分の多い添加剤A、Bでは再生5であっても、軟化点が55~65℃程度とORGに比較的近い値となっていることから、芳香族分の多い添加剤はアスファルトの繰り返し再生利用に対して、軟化点の回復効果が高いことが示された。

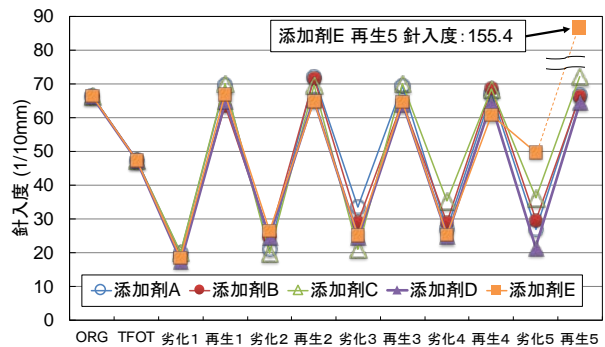


図-4 劣化・再生アスファルトの針入度

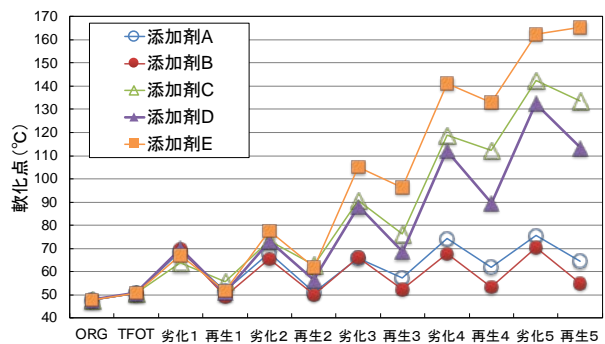


図-5 劣化・再生アスファルトの軟化点

(c) 劣化・再生アスファルトの伸度

伸度の推移を図-6に示す。添加剤A、Bでは、再生1回、2回まで100~30cm程度まで回復が見られたが、添加剤C、D、Eでは再生2回目以降ほとんど回復しなかった。したがって、芳香族分の多い添加剤の方が繰り返し

再生時にも伸度の回復しやすい傾向であることが分かった。しかし、いずれの添加剤も舗装再生便覧⁸⁾に示されている伸度100cmまでは回復していなかった。これは今回の実験では、再生時に新規アスファルトを全く添加しておらず、実際の再生に比べて非常に厳しい条件であったことによると考えられた。

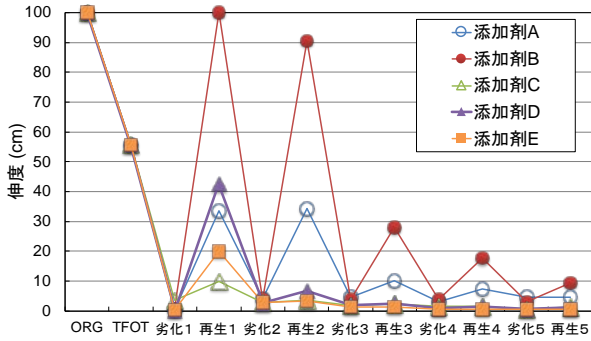


図-6 劣化・再生アスファルトの伸度

(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-7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-8に示す。コロイダル指数とは、アスファルテン分と飽和分の和を芳香族分とレジン分の和で除した値を指す。芳香族分が多い添加剤Aではコロイダル指数の変化が小さいのに対し、飽和分の多い添加剤C、Eでは増大する傾向にあり、特に添加剤Eは再生2回目以降の急激に増大した。

以上より、アスファルトの4成分組成分析において飽和分の多い添加剤は、芳香族分が多い添加剤と比較して、再生時に芳香族分の供給が少ないので、再生アスファルトの芳香族分が減少しやすい傾向を示した。特に再生回

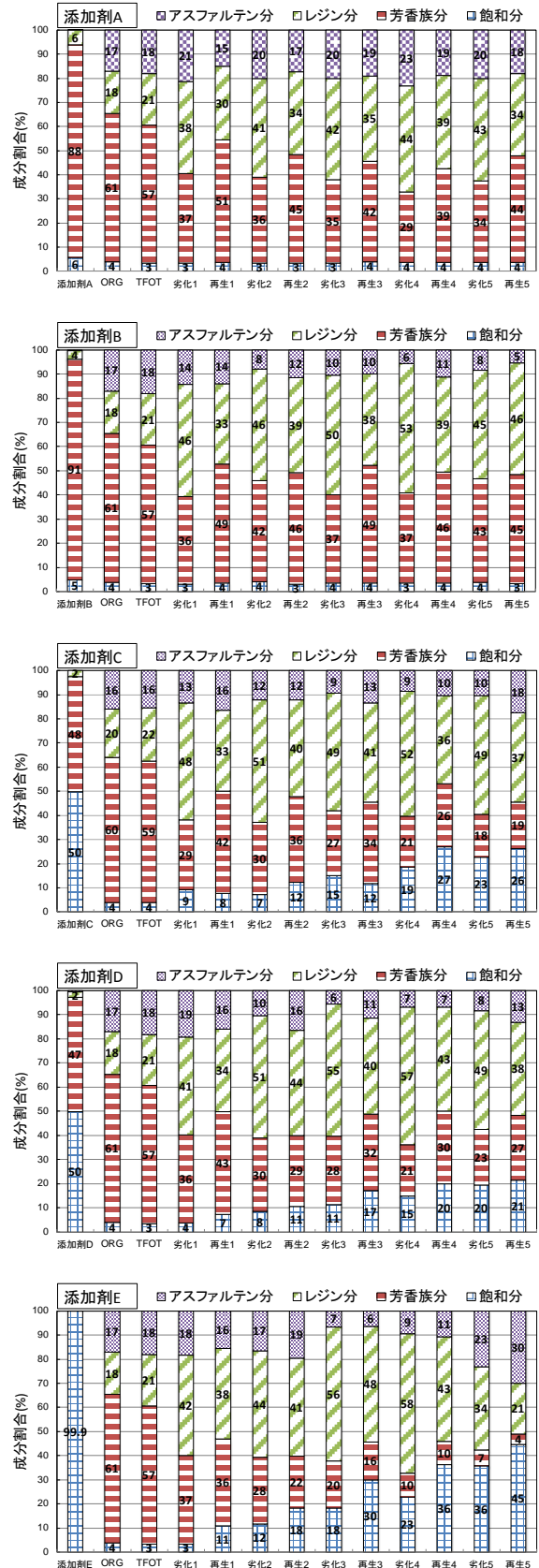


図-7 劣化・再生アスファルトの4成分組成

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。

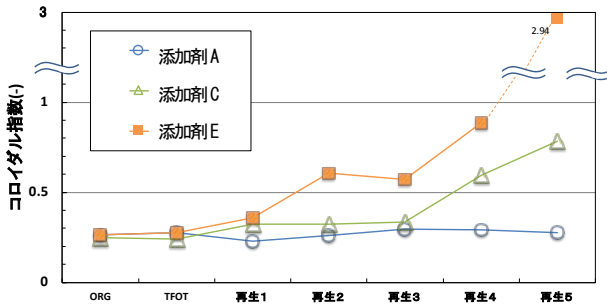


図-8 再生アスファルトのコロイダル指数

(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-9 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⁹⁾、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。

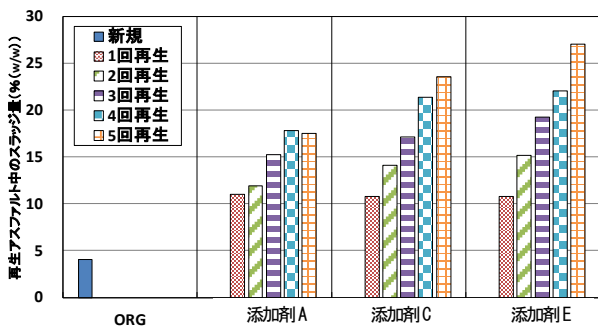


図-9 再生アスファルトのスラッジ量

(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-10~12 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-10 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

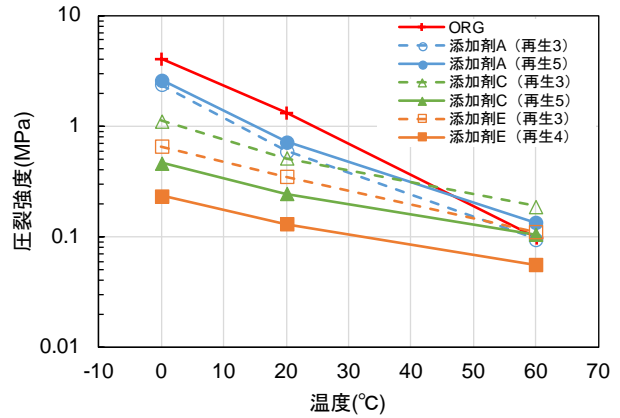


図-10 再生混合物 A, C, E における圧裂強度

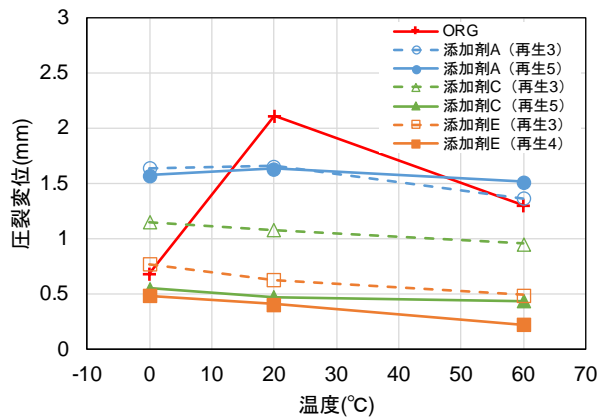


図-11 再生混合物 A, C, E における圧裂変位

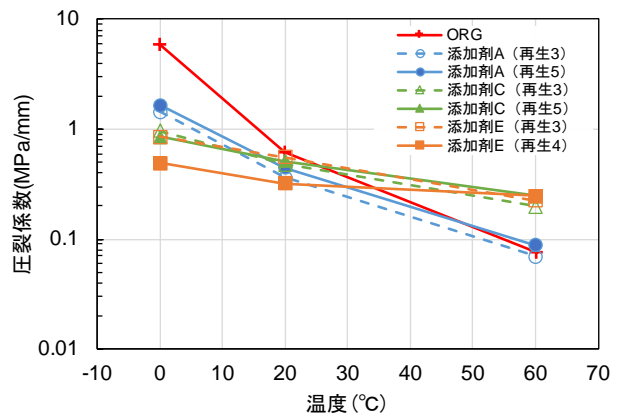


図-12 再生混合物 A, C, E における圧裂係数

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-11 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

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-12 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。

以上より、圧裂試験の結果、新規混合物と比べ再生混合物は感温性が鈍くなる傾向が見られ、特に飽和分が多い添加剤 C、E でその傾向が強かった。また、添加剤 C、E で再生した場合、圧裂強度、圧裂変位ともに小さくなる傾向を示し、繰り返し再生が進むほど小さくなっていく傾向を示した。圧裂係数で見ると、20°C の圧裂係数は新規混合物と再生混合物で同程度になった。これは、過去の研究^{例えば¹⁰⁾}により圧裂係数は針入度との相関性が指摘されており、今回の混合物も 25°C で針入度を 70 に調整したものをを用いていることから、20°C の圧裂係数も同程度となったものと考えられる。また、60°C においては新規混合物と添加剤 A を用いた再生混合物と、添加剤 C、E を用いた再生混合物の 2 つのグループに分かれた。つまり、芳香族分の多い添加剤 A は、20~60°C 付近の性状を新規混合物に近い性状まで回復させているのに対し、添加剤 C、E は 60°C 付近では新規混合物と異なる性状を示した。高温で圧裂係数が大きいことが供用性状においてどのような影響があるかは現時点では明らかではないが、再生混合物が新規混合物より強度が大きく変位が小さい性状を示すことが明らかになった。

2) ホイールトラック試験（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-7 に示す。動的安定度は、ORG、再生 3、再生 5 になるにしたがって高くなった。これは、圧裂試験において高温域（60°C）で再生混合物の圧裂強度が新規混合物より高くなったこと、軟化点が高くなった結果を反映しているものと考えられる。

表-7 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-13 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ので、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。

高温カンタプロ試験の結果より、破壊しにくいグループである新規混合物および芳香族分が多い添加剤 A、B を用いた再生混合物と、破壊しやすいグループである飽和分が多い添加剤 C、D、E を用いた再生混合物に分かれた。この結果は、60°C の圧裂係数で見られた傾向と同様であった。高温カンタプロ試験の試験温度である 60°C は、日本における夏季の路面温度に相当するものである。この温度域では、通常流動わだちを考慮することが多いが、縦表面ひび割れもこの温度域で発生する可能性が指摘されている¹¹⁾。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。

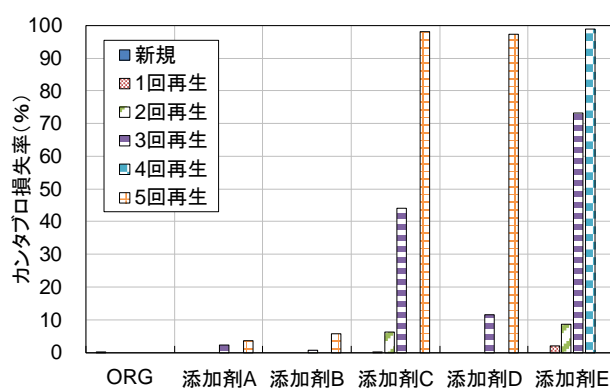


図-13 各再生混合物における高温カンタプロ試験結果

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% および 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、圧裂試験および小型曲げ試験、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-14に示す。低温条件下(0°C)の圧裂強度(図-14上)はいずれも繰り返し再生が進むにつれて減少傾向となった。その傾向は、R率が100%より80%、添加剤がCよりAのほうが緩やかになった。一方、高温条件下(60°C)では、圧裂強度は全体的に絶対値が小さく、差は僅かであるが添加剤Cの100%再生以外は増加傾向となった。低温条件と同様に、添加剤Aによる80%再生の性状変化は緩やかとなった。

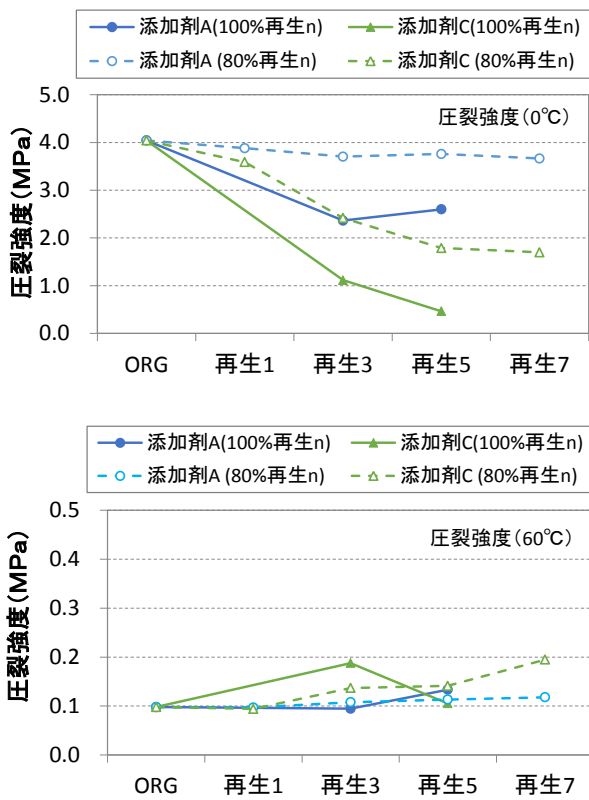


図-14 圧裂強度 (上: 0°C、下: 60°C)

次に、圧裂強度比(0°C/60°C)を図-15に示す。圧裂強度比は値が大きいとわだち掘れが大きく、小さいとひび割れが発生しやすいとされている²⁾。図より、圧裂強度比はいずれも繰り返し再生が進むにつれ減少した。特に、80%再生より100%再生、添加剤AよりCのほうが傾向が顕著となったことから、ひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

2) 圧裂変位および圧裂係数

圧裂変位および圧裂係数を図-16、17に示す。低温条件下では、圧裂変位が再生3回まで上昇しそれ以降はや

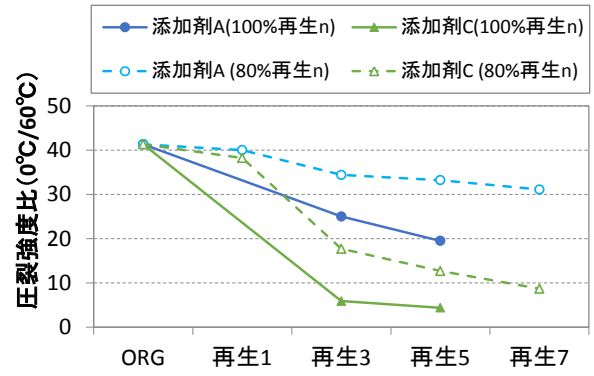


図-15 圧裂強度比

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

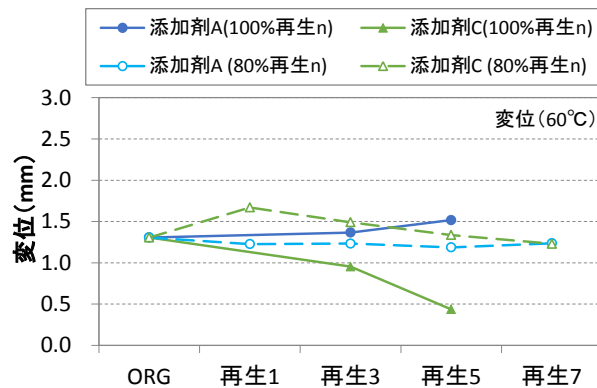
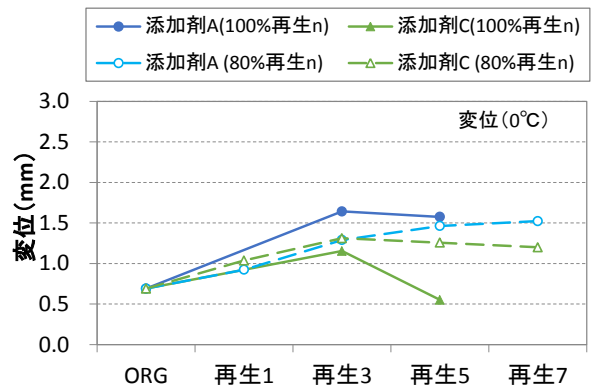


図-16 圧裂変位 (上: 0°C、下: 60°C)

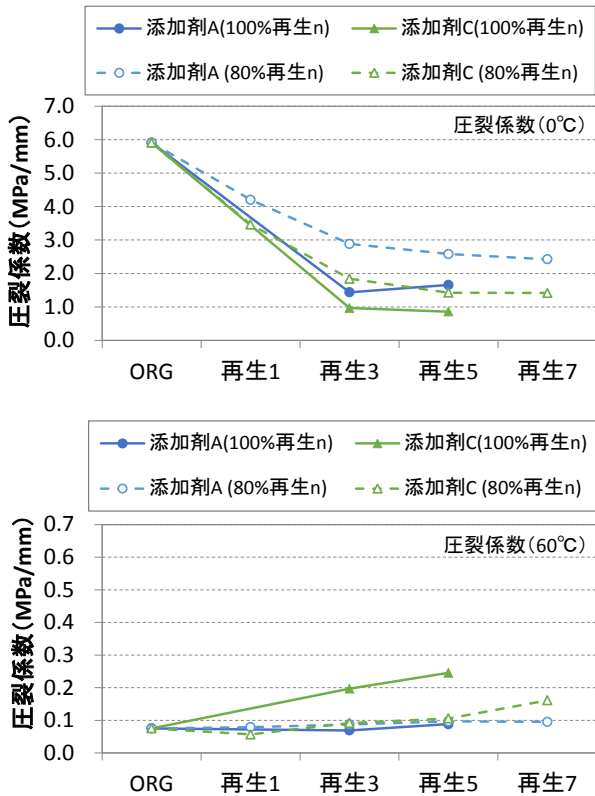


図-17 圧裂係数 (上: 0°C、下: 60°C)

(2) 小型曲げ試験

低温時の脆性を把握するための小型曲げ試験結果を図-18 に示す。繰り返し再生が進むにつれ、脆化点 (強度のピーク、ひずみの変曲点) が低温側にシフトしていくのがわかる。これは、再生混合物は新規混合物より、低温時のたわみ追従性を有するとも言える。ただし、0°C以上の曲げ強度に着目すると、ORG より大きく低下していることから高温でのひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

2.4 まとめ

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

今後も引き続き、再生用添加剤の成分や再生骨材配合率の差異による繰り返し再生に与える影響に関する試験データを充実していくとともに、本実験で得られた

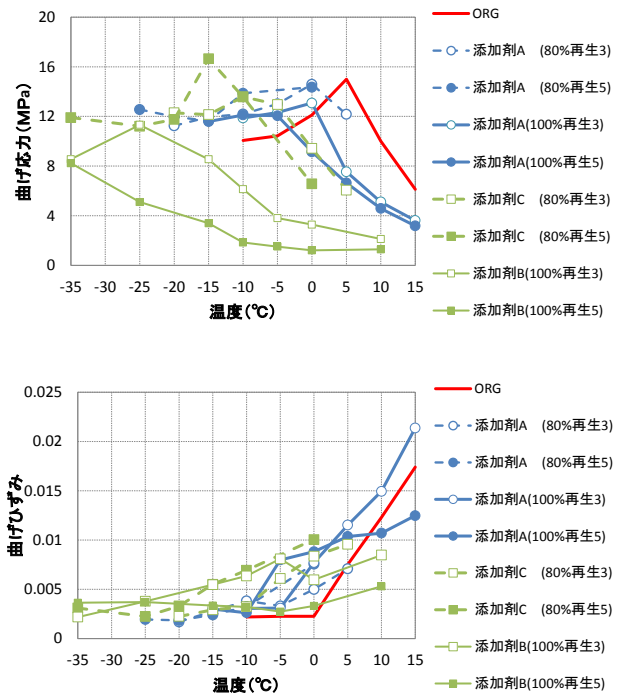


図-18 小型曲げ試験結果 (上: 曲げ強度、下: 曲げひずみ)

結果と実際の舗装の破損形態との関連性について検討を進めていく予定である。

3. 積雪寒冷地の再生骨材の品質規格・品質管理方法及び有効利用法の開発

アスファルトの繰り返し再生利用により、今後、寒冷地では舗装寿命への影響が強く現れることが懸念されている。また、積雪寒冷地の地方部においては、舗装工事減少に伴いアスファルト塊の再生混合物への利用量が減少しており、用途拡大が求められている。ここでは、積雪寒冷地における再生骨材および再生混合物の性状について、舗装工事箇所より採取した試料を用いた検討を実施した結果と、アスファルト再生骨材の凍上抑制層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 As 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-19)。

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

そこで、既存の針入度による配合設計法で室内において作製した再生混合物、および北海道内の再生アスファルトプラントより収集した再生混合物(以下、プラント混合物)を用いて、針入度 80-100 の場合の圧裂係数による配合設計法の適用性について検討を行った。

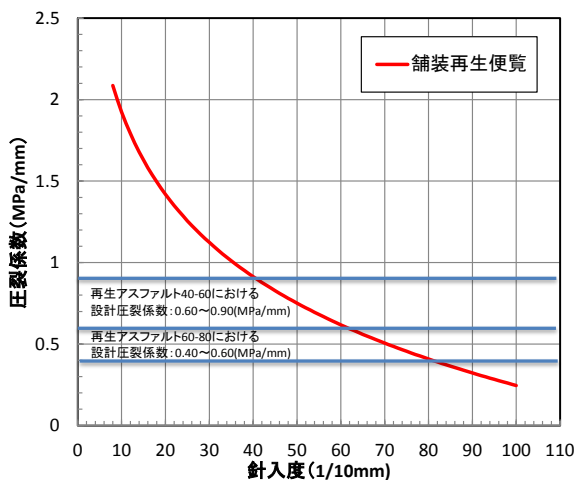


図-19 再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係

(1) 評価対象

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

- ①室内作製混合物：旧アスファルトの針入度が20(1/10mm)の試料をプラントより収集し、寒地土木研究所にて配合設計を実施した再生混合物。
- ②現場混合物：4箇所(舗装現場)でアスファルトフィニッシャのホップより採取した再生混合物
- ③再検討混合物：②に示した舗装現場の再生混合物出荷当日にアスファルトプラントの骨材ストックヤードより

採取した骨材を持ち帰り、再生骨材の旧アス針入度を評価し、当研究所で改めて再生添加剤の添加率を決定し、配合設計を行った再生混合物。

(2) 配合条件

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

また、再生にあたっては、舗装再生便覧に示されている設計針入度への調整を行う方法を用い、設計針入度はストレートアスファルト 80-100 の中央値である 90(1/10 mm)で統一している。

3.1.2 試験結果

(1) 室内作製混合物

再生混合率の異なる3条件の再生混合物と、比較として新規混合物の圧裂係数を計測した。結果を図-20に示す。再生混合物の圧裂係数は0.29~0.35(MPa/mm)の範囲であり、新規混合物や再生アスファルト 60-80 の設計圧裂係数の範囲(0.40~0.60(MPa/mm))よりも小さい値であった。

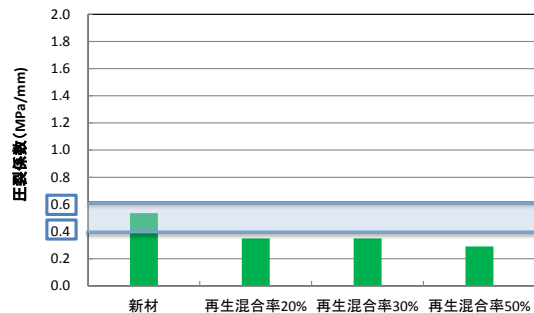


図-20 室内作製再生混合物の圧裂係数

(2) 現場混合物

現場混合物の圧裂係数を図-21に示す。現場混合物の圧裂係数は0.86~1.27(MPa/mm)であり、前述の室内作製混合物のように0.40(MPa/mm)以下とはならなかった。

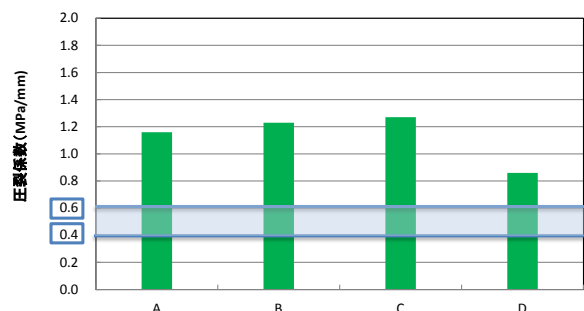


図-21 現場混合物の圧裂係数

③ 再検討混合物

現場混合物の配合設計に用いられた旧 As の針入度と再生添加剤添加量、および再検討混合物の配合設計に用いられた旧 As の針入度と再生添加剤添加量を表-8 に示す。再検討時と旧 As 針入度の値に大きな開きが見られた。このため、再生添加剤の添加量も大きく異なる結果となった。現場配合は、年度当初に行われているが、再生骨材の性状は出荷時期によって変動するため、このような違いが発生した可能性がある。

再検討混合物の圧裂係数を図-22 に示す。再検討混合物の圧裂係数は0.59~0.77(MPa/mm)と現場混合物と比較して小さな値となった。圧裂係数が大きいほど、硬く脆く、圧裂係数が小さいほど柔軟性のある傾向と判断できるが、旧 As 針入度を評価し直した結果、再生添加剤の添加率が増加したことから、再検討混合物は現場混合物よりも柔軟性を有する性状となったと考えられる。

表-8 旧 As 針入度と再生添加剤添加量

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

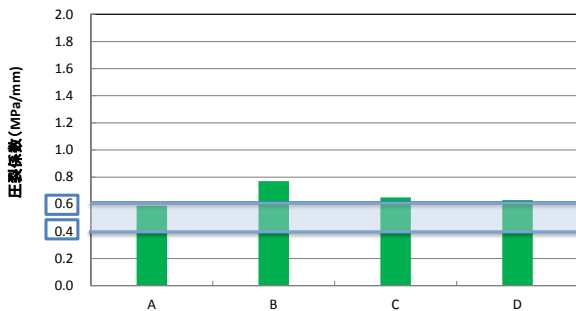


図-22 再検討混合物の圧裂係数

3.1.3 考察

図-19 に示した舗装再生便覧に記載のある再生アスファルトの針入度と圧裂係数の関係から推測すると再生アスファルト 80-100 に対応する設計圧裂係数は0.25~0.40(MPa/mm)程度と想定される。しかし、現場混合物の範囲は0.86~1.27(MPa/mm)であり、再検討混合物でも0.59~0.77(MPa/mm)と、推定範囲より大きな値となっている。この要因として、前述した再生添加剤の添加量の影響の他に、再生骨材の性状にも要因があると考えられるため、設計圧裂係数の設定に向け、今後更なる検討が必要と考える。

また、今回採取した4箇所すべてにおいて再生骨材の旧 As の針入度は規格下限である20(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、さらに 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行く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。

3.2 再生骨材の凍上抑制層等への利用方法の検討

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

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

3.2.1 凍上抑制層材料の検討に用いた再生骨材の性状

凍上抑制層材料の検討に用いた再生骨材の性状を表-9 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-9 再生骨材の性状

試験項目		単位	As再生骨材	規格値
洗い試験	全量に対する0.075mm通過量	%	2.57	—
	4.75mm以下に対する0.075mm通過量	%	7.13	15以下
密度・吸水率試験	表乾密度	g/cm ³	2.369	—
	絶乾密度	g/cm ³	2.303	—
	吸水率	%	2.88	—
修正CBR試験	最適含水比	%	4.8	—
	最大乾燥密度	g/cm ³	1.917	—
	修正CBR(20℃)	%	12.3	—
土の液性限界・塑性限界試験	塑性指数	—	NP	—
凍上試験	凍上率(道路土工排水工指針による)	%	7.5	20以下

3.2.2 凍上抑制層としての支持力評価

再生骨材を凍上抑制層材料として用いる場合、路床材料としての扱いとなり、20cm以上の層厚となる場合、設計 CBR の再計算が必要となるため、支持力を確認する必要がある。特に、温度の上昇によって支持力が低下することが知られており、温度と支持力の関係を把握するこ

とが重要である。ここでは、修正 CBR 試験、実施工箇所の CBR を現場にて簡易に推定できるダイナミックコーンペネトロメータ試験（以下、DCP 試験）、および FWD 試験を用いて評価を行った。結果を以下に示す。

(1) 修正 CBR 試験

表-9 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-23 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。

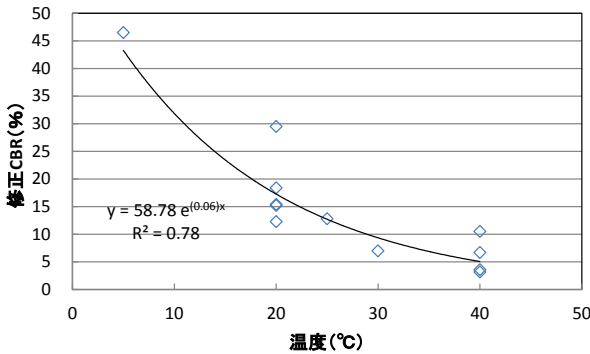


図-23 修正 CBR と温度の関係

(2) DCP 試験

表-9 に示した材料を層厚 30cm で転圧し、測定日を変えて、温度の異なる条件で DCP 試験を実施した。得られた結果より推定した CBR と温度の関係を図-24 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。

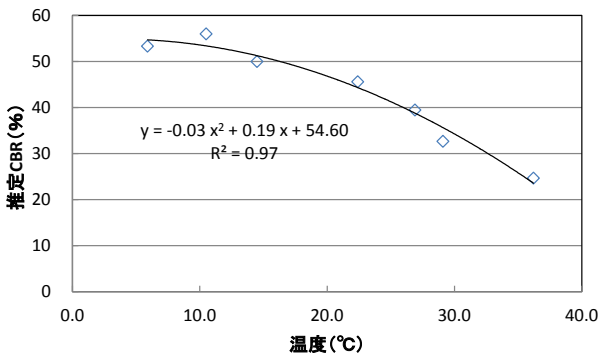


図-24 推定 CBR と温度の関係

3.2.3 路床材料としての CBR の検討

CBR 修正および 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-25、26 に示す。2 路線ともいずれの調査年においても凍上抑制層の温度は 30℃まで達していない状況であった。

As 再生骨材は図-23 に示したとおり 30℃未満の条件下であれば、10%以上の修正 CBR が得られると考えられる。

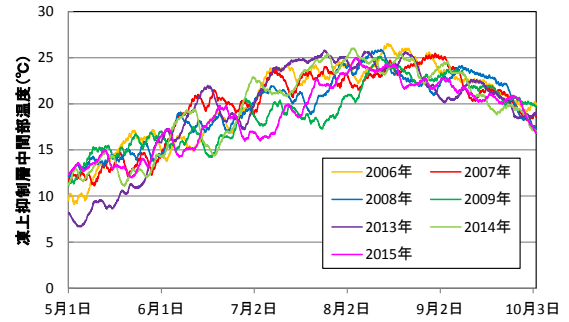


図-25 R238 稚内の凍上抑制層温度

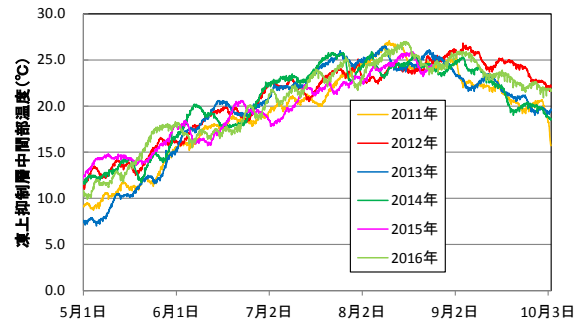


図-26 R231 留萌の凍上抑制層温度

3.2.4 供用性状の評価

(1) FWD 試験

表-9 に示した再生骨材と切込砕石 80mm 級を凍上抑制層材料として用いた試験施工を行い、図-27 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-28 に示す。再生骨材は切込砕石と比較して概ね同等の値で推移している。また、融解期である春期と、標準的な環境と考えられる秋期の値を比較すると、再生骨材と切込砕石の値の変化も同等であり、融解期の明確な支持力低下は確認されなかった。一方、温度上昇により支持力低下が懸念される夏期においては、他の時期よりも D_0 たわみ量が高い値となっているが、同様の傾向が切込砕石においても

見られる。

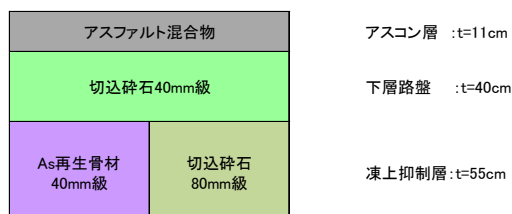


図-27 試験施工箇所の断面

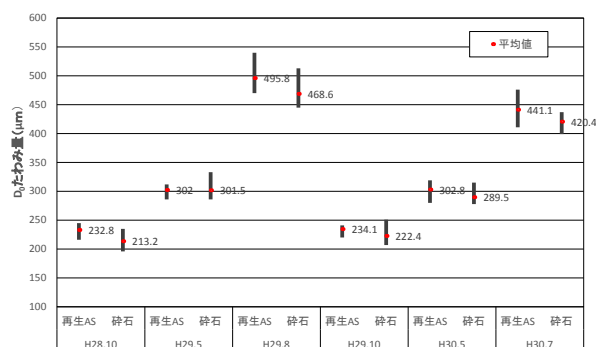


図-28 FWDによるD₀たわみ量

3.2.5 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。今後は、更なる用途拡大のため、歩道用路盤材としての適用性について、過年度に試験施工を行った箇所の追跡調査等を行い、実用化に向けた検討を進めていく。

4. まとめ

平成30年度までに、アスファルト混合物の繰り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、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り返し再生した場合、初期に添加量が多くなるが、繰り返し再生し

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、繰り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) 繰り返し再生すると、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り返し再生した場合、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、特に繰り返し再生が進むと、どの再生用添加剤でも十分に回復させることはできなかった。

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

5) 圧裂試験の結果、飽和分が多い再生用添加剤の場合、繰り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) 高温カンタブロ試験の結果、飽和分の多い再生用添加剤で繰り返し再生を行うと、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り返し再生した場合は、損失率の増加は顕著ではなかった。

7) 繰り返し再生が進むにつれて再生骨材配合率および添加剤の成分差異により、新規混合物の性状との差が大きくなることがわかった。この繰り返し再生による新規混合物との差は、再生骨材配合率100%と再生骨材配合率80%とも同様な傾向を示したが、再生骨材配合率では80%、添加剤はAのほうが性状変化の傾向は緩やかになることがわかった。

8) 現場より採取した針入度規格80-100の再生混合物の圧裂係数は、舗装再生便覧より推定される範囲よりも大きな値であり、設計圧裂係数を検討する上で、要因の解明が必要と考える。

- 9) 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。

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，2018.
- 2) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 3) (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.
- 4) 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.
- 5) ISO 10307-1：Petroleum products -- Total sediment in residual fuel oils -- Part 1: Determination by hot filtration, 2009
- 6) 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
- 7) 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.
- 8) (公社)日本道路協会：舗装再生便覧（平成 22 年度版），pp.167-191，2010.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.

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員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。

平成30年度は、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。また、再生中温化混合物の性状試験を実施し、混合温度や再生用添加剤の組成の影響を検証した。

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員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。

平成30年度は、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。また、再生中温化混合物の性状試験を実施し、混合温度や再生用添加剤の組成の影響を検証した。

2. 中温化再生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、中温化再生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。中温化再生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

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

表-1 アンケートの集計結果

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

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

3. アスファルトフェームの室内測定手法の検討

3.1 概要

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

3.2 既往研究

アスファルトには少量の揮発性、半揮発性の有機化合物が残存しているため、加熱して液体状になったアスファルトからは、微量の有機化合物がアスファルトフェームとして発生する。フランスの LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées、現 IFSTTAR) では、アスファルト混合物から発生する有機化合物の排出量についての研究が行われており、アスファルト混合物から発生する物質を図-1 のように分類した³⁾。海外の既往研究では、室内試験にて、混合時の攪拌強度や温度と TOC(e)の発生量との相関について報告されているものが多い。また、屋外作業員に吸着管等を取り付けて、作業中の全粒子状物質 (以下、TPM)やベンゼン可溶成分(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。

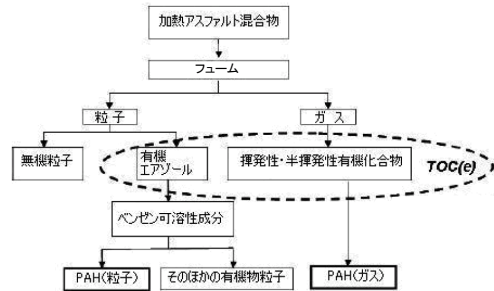


図-1 アスファルト混合物から発生する物質

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。

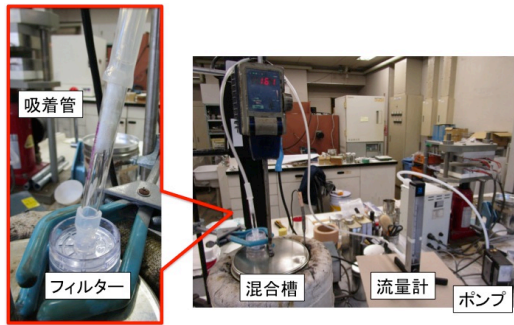


写真-1 アスファルトフューム測定系の様子

3.3.3 測定手順

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

3.4 結果

3.4.1 フィルタの目視観察

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

3.4.2 TPM および BSM 量の温度依存性

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

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

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

表-3 アスファルトフューム吸引後のフィルタの状態

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

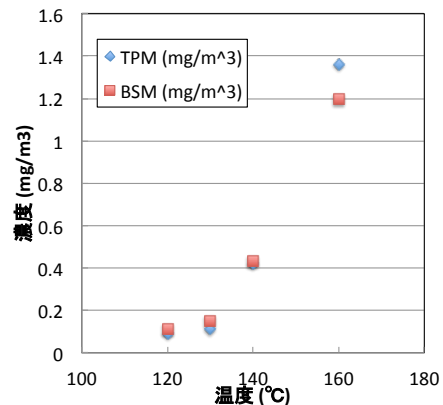


図-2 TPM および BSM 濃度

4. 再生アスファルト混合物から発生するアスファルトフューム発生量の検証

4.1 概要

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

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

4.2 方法

4.2.1 試料

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

表-4 使用材料の性状

	ストレートアスファルト 60/80		添加剤	
	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+	アスファルトテン分	0
伸度 (cm)	100+	レジン分	6.1	2.5
		芳香族分	88.1	47.7
		飽和分	5.7	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	添加剤A	18.6	
旧アスファルト比 (%)	添加剤B	15.0	
旧アスファルトの再生後針入度 (1/10mm)		70	

4.2.2 アスファルトフェウム採取方法

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

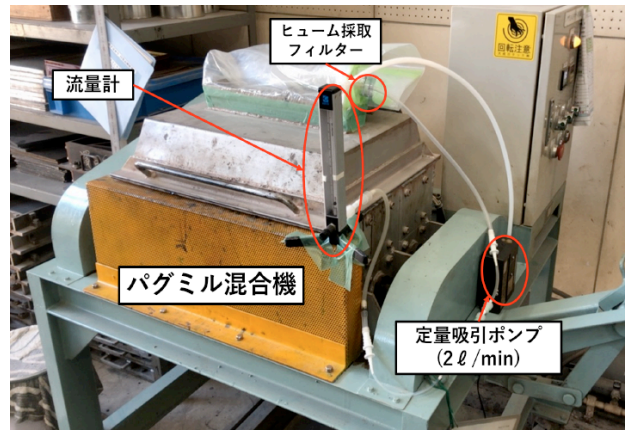


写真-2 アスファルトフェウムの採取状況

4.2 BSM 量

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

表-6 アスファルトフェウム採取の試験条件

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

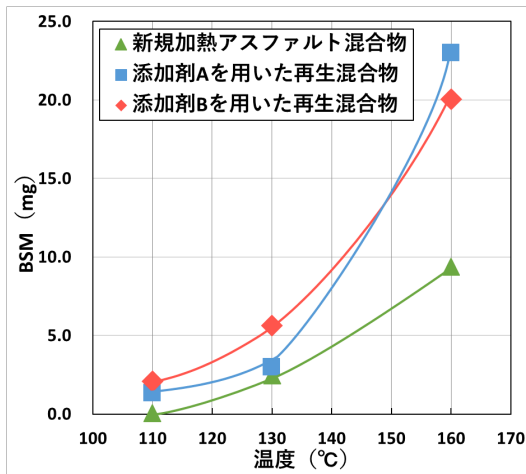


図-3 各混合物から採取したBSM量

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。

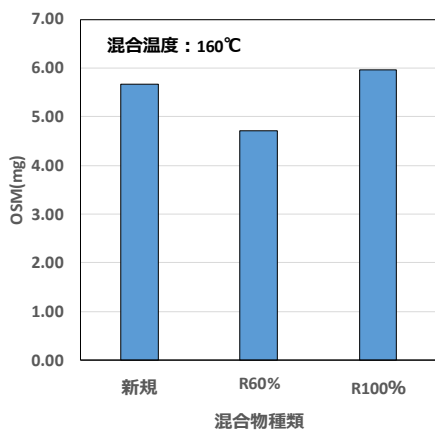


図-4 再生アスファルト混合物からのアスファルトフェーム量

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。

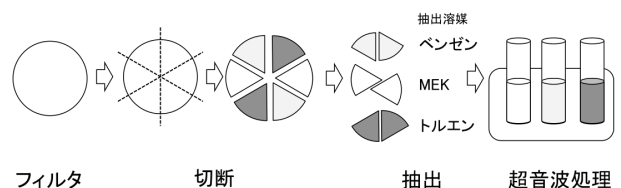


図-5 抽出手順

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。

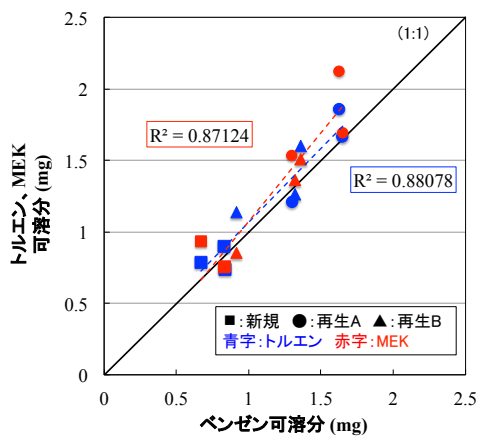


図-6 有機溶剤可溶分の相関

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

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

6.2 試験概要

6.2.1 採取条件

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

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

6.2.2 抽出条件

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

6.3 結果

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

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

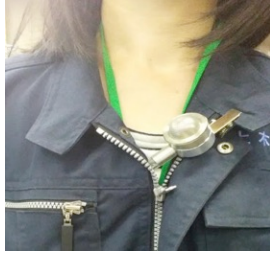


写真-3 作業員用フィルタ



写真-4 作業場近傍の
フィルタ設置状況

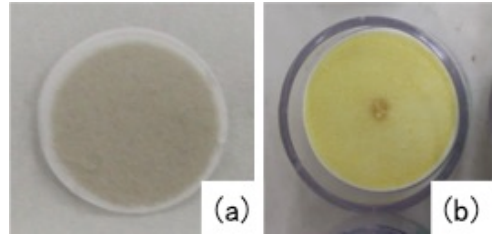


図-9 フィルタの様子

(a)作業員 B (b)4章の試験で採取されたフィルタ

表-7 作業概要

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

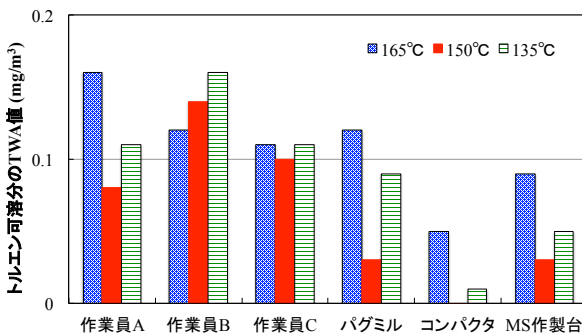


図-7 トルエン可溶分のTWA値

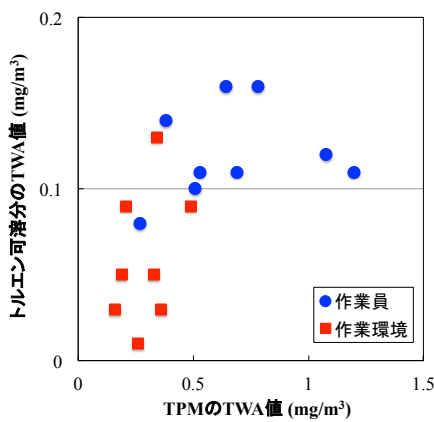


図-8 トルエン可溶分のTWA値

7. 再生中温化混合物の性状評価手法の検討

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、加熱温度を低減している例が少ないことを示した。また、施工性改善を目的としていることが多いため、どの程度温度を低減することが可能か、また、低減した場合の性状評価について、十分な知見は得られていない。そこで、再生中温化アスファルト混合物の性状に対する混合温度の影響を調べた。また、促進劣化試験も行い、劣化に伴う性状変化についても検証した。

7.2 試験概要

7.2.1 試料

混合物の種類など、試料条件を表-8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-9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、前章までと異なる再生用添加剤であるが、芳香族分の多いものと飽和分の多いものを選定して使用した。再生用添加剤の性状は表-10に示す通りである。

表-8 試料条件

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-9 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- 10 再生用添加剤の性状(各材料の性状表参照)

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	0.8
	レジン分	2.6	4.6
	芳香族分	63.6	15.1
	飽和分	33.3	79.0

7.2.2 劣化試験

促進劣化試験として、表-8 および表-9 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¹⁰⁾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。

7.2.3 性状試験

アスファルト混合物の性状試験として、カンタプロ試験および圧裂試験を行った。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。

7.3 結果

各混合物の締固め度を表-11 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ている。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、添加剤 B は飽和分が多く、いずれの混合温度でも、高い締固め度を確保できた。

圧裂試験の結果として、各アスファルト混合物の圧裂係数を図-10 に示す。劣化0日の場合、再生中温アスファルト混合物の圧裂係数は混合温度が低いほど、圧裂係数が低く、混合時の熱劣化が抑制されたものと考えられた。また、再生用添加剤Bを使用したアスファルト混合物は、劣化に伴う圧裂係数の変化が小さかった。

図-11 にカンタプロ損失量の結果を示す。劣化日数が増えるのに伴い、カンタプロ損失量が増加し、骨材飛散しやすい傾向が見られた。しかし、損失量が大きいもので14%程度であった。

これら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が進行したのか、明確ではない。再生中温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。

表-11 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

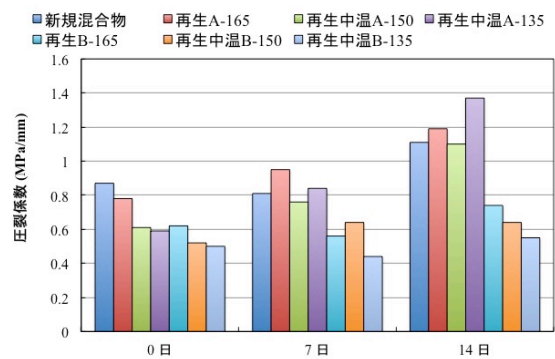


図-10 圧裂係数

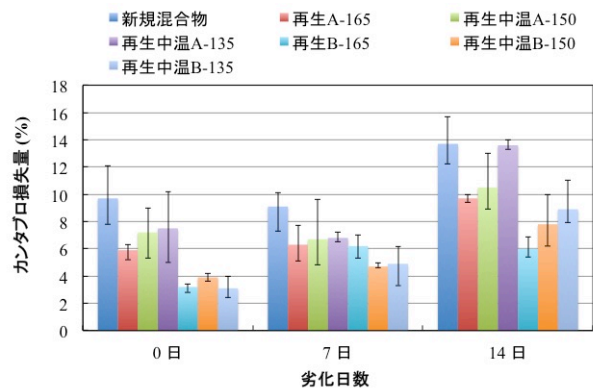


図-11 カンタプロ損失量

8. まとめ

平成 30 年度までに得られた結果は次の通りである。

- 現状において、中温化再生アスファルト混合物の製造経験がある合材プラントは非常に少なく、さらに製造温度を 20°C以上上げて製造した経験のあるプラントは、全体の 2%程度しかなかった。
- アスファルト混合物の攪拌槽に蓋をしてアスファルトフェ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ェ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。
- 再生用添加剤の種類によっては、締固め度温度の低下により、締固め度の確保が難しいものもあった。
- 再生用添加剤の種類によって、劣化度合いに差が見られたが、その原因についてはより詳細な検証が必要と考えられた。

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) NIO SH 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公演概要集、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) 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.

9.2 リサイクル材等の環境安全性評価・向上技術の構築

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

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質）

寒地基礎技術研究グループ（防災地質）

研究担当者：阿南修司、品川俊介、倉橋稔幸、田本修一

【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を試験溶媒として用いた連続溶出試験を実施し、酸化と還元によるヒ素・ホウ素の溶出傾向を把握した。また、溶出操作の異なる繰返し溶出試験を実施し、溶出操作の違いによるヒ素の溶出傾向を把握した。その結果、酸化還元電位が概ね 400mV から 100mV までの還元的な環境に近づくとヒ素、ホウ素の溶出量が増加することを確認した。さらに、攪拌翼よりも水平振とうによる溶出操作がヒ素の積算溶出量が多いことを確認した。

岩石からの長期的な重金属等の溶出傾向を把握する試験である土研式雨水曝露試験結果を用いて、岩種と元素ごとに溶出パターンの特徴について分析を行ったところ、長期的に溶出濃度が増加する対応の必要性が高いパターンに該当する試料は、酸性化するものに多いことがわかった。

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

1. はじめに

土壤汚染対策法の改正（H22.4 施行）により、自然由来重金属等を含む土壌が規制の対象になり、法対象外である岩石ずりも自主的に対応する事例が急増している。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、高額のコスト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連続溶出試験を実施し、酸化還元電位を変化させヒ素・ホウ素の溶出傾向を分析した。そして、より還元的な環境を再現するため、水素ガスバブリングにより作製した水素水を試験溶媒として用いた連続溶出試験を開発・実施し、ヒ素・ホウ素の溶出傾向を分析した。

また、ヒ素（As）を含む凝灰角礫岩ずり、軽石凝灰岩ずりおよび泥岩ずりを対象に、蒸留水を用いて溶出操作の異なる繰返し溶出試験を実施し、溶出操作の違いによるヒ素の溶出傾向を分析した。

さらに、岩石からの長期的な重金属等の溶出傾向を把握する試験である土研式雨水曝露試験結果を用いて、元素ごとに溶出パターンの特徴の分析を試みた。

2. 研究方法

2.1 ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりの連続溶出試験

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。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、2 mm ふるいを通過したものをインクリメント法により分取後、連続溶出試験に供した。

2.1.2 連続溶出試験方法

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

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

水素水を用いた連続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、水素水と泥岩ずりを PVC ボトル中で混合した。水素水は、蒸留水に電動歯ブラシ型ウルトラファインバブル発生器を用いた水素ガスバブリングにより作製した。さらに、試験後の酸化還元電位の上昇を抑えるため、試料投入後の PVC ボトルをアルミ袋に入れ脱気封入した。いずれの試験も振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm で 6 時間振とうし、それを 30 分間静置後に、再び 3,000 rpm、30 分間遠心分離した。蒸留水溶液は 0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過し、脱気水溶液および水素水溶液については窒素封入したグローブバック内でシリンジフィルター（孔径：0.45 μm）により加圧ろ過し固液分離し、それぞれのろ液を検液とした。その後、試料残渣を用いてヒ素が環境基準値以下を示すまでの計 5 回、繰り返し試験を実施した。

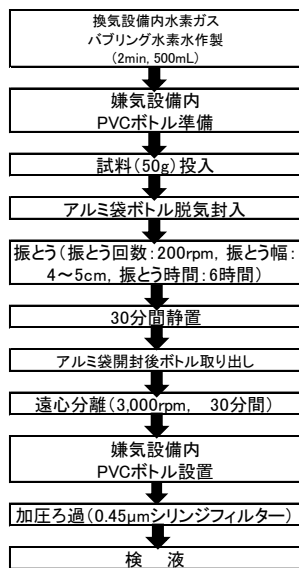


図-1 水素水を用いた連続溶出試験方法のフロー図

表-1 分析項目および分析方法の一覧

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

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

2.2 溶出操作の異なる繰返し溶出試験

2.2.1 試料

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

2.2.2 粒度試験方法

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

2.2.3 繰返し溶出試験方法

溶出操作の異なる繰返し溶出試験は、環境庁告示第 46 号の付表で示される方法を準用した試験（水平振とうによる繰返し溶出試験）と JIS K 0058-1 で示される方法を準用した試験（攪拌翼による繰返し溶出試験）をそれぞれ最大 8 回繰り返し実施した。蒸留水を溶媒に液固比 10 の割合で各岩石ずりを PVC ボトルに投入した。水平振とうによる繰返し溶出試験では、PVC ボトルを振とう機に設置後、振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm で 6 時間振とうした。攪拌翼による繰返し溶出試験では、攪拌装置を PVC ボトルに取り付け、ボトル内の溶媒を毎分約 200 回転で 6 時間攪拌した。各試験の溶出操作後、PVC ボトルを 30 分間静置し、3,000 rpm、30 分間遠心分離した。固液分離は、蒸留水溶液が 0.45 μm メンブランフィルターで吸引ろ過し、そのろ液を検液とした。その後、試料残渣を用いて繰返し試験を実施し、As が環境基準値以下を示す、または、一定の濃度を示すま

での最大8回行った。

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

2.3 土研式雨水曝露試験の元素別溶出パターン分析

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

土研式雨水曝露試験(図-2)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である。本試験は、酸化的で乾湿繰り返し起こる状況下での長期的な重金属等の溶出性やその時間変化、および酸性化の状況を把握するものである。

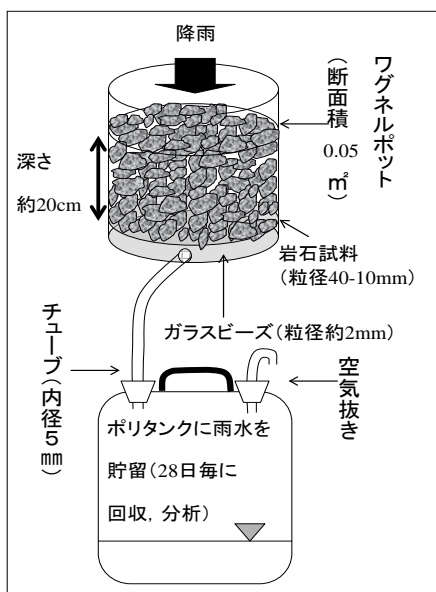


図-2 土研式雨水曝露試験の概要¹⁾

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。

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

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

表-2 分析対象試料一覧

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

3. 研究結果

3.1 連続溶出試験結果

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-3に示す。連続溶出試験の酸化還元電位は、蒸留水、脱気水、水素水の順に低下した。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の低下が小さくなる傾向を示した。また、Asは酸化還元電位が低下すると、積算溶出量も増加した。一方、Bは酸化還元電位が低下すると1回目の積算溶出量が増加したが、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のAl、FeおよびSiO₂は、蒸留水と比較して高い積算溶出量を示した。特に、脱気水のものが最大値を示した。そのほか、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、水素水のものと比較して蒸留水のものが高値を示した。これらは、蒸留水と比較して酸化還元電位の低い脱気水・水素水が、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。

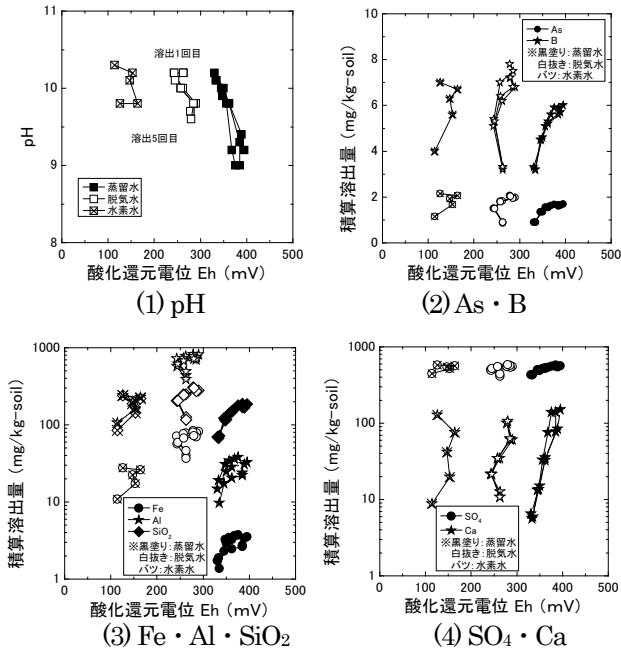


図-3 酸化還元電位と pH および各分析項目の積算溶出量との関係

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

溶出回数と As 溶出量との関係を図-4 に示す。溶出 1 回目の As 溶出量は、いずれの試料においても攪拌翼の方が低い値を示した。また、溶出回数が 2 回目以降は、溶出操作を問わずすべての試料で As 溶出量が低下した。特に、泥岩ずりは他の 2 試料と比較して、少ない溶出回数で As 溶出量の低下も顕著であった。

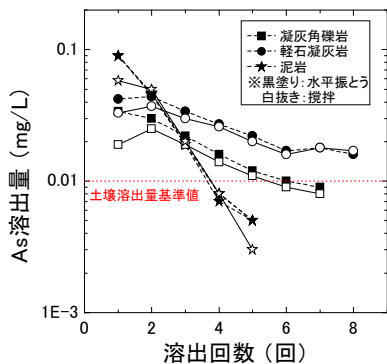


図-4 溶出回数と As 溶出量との関係

溶出回数と As 積算溶出量との関係を図-5 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。

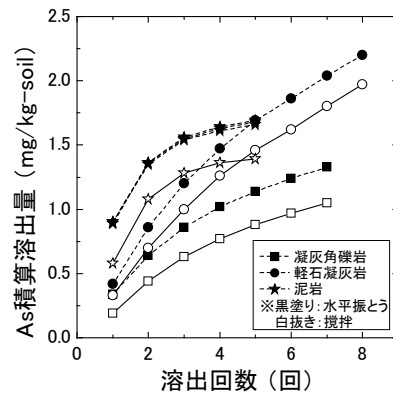


図-5 溶出回数と As 積算溶出量との関係

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-6 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-5 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 の溶出量が增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、より実現象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。

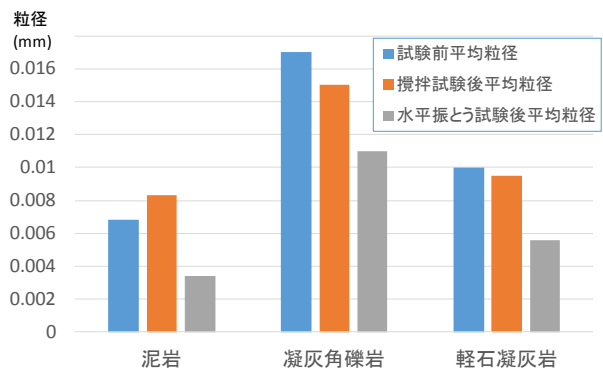


図-6 水平振とうおよび攪拌翼による繰返し溶出試験前後の試料の平均粒径

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いけない。その上で、今後の試験方法の取り組みについて、図7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を縦軸に、試験の所要時間と室内から実規模までの試験の扱いやすさを共に横軸にとり、各試験を位置づけた。室内と実規模では試験期間が異なることから、短い検討期間で発生源評価を行う場面では、攪拌翼による溶出試験、還元を再現する脱気水や水素水を用いた溶出試験を実施することが有効であるとする。一方、現場の規模が大きく比較的発生源評価の検討期間が長くとれる場面では、大型カラム試験や実大盛土試験が有効であるとする。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。

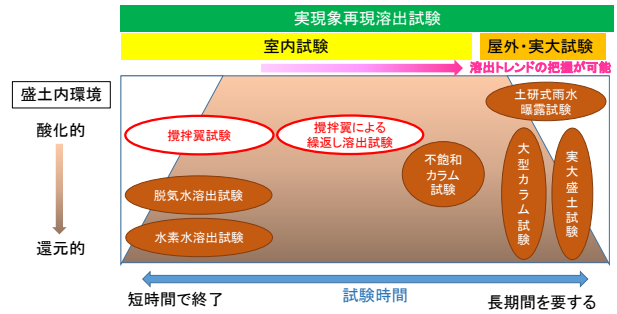


図7 盛土内環境を想定した各種実現象再現溶出試験の位置づけ

3.4 土研式雨水曝露試験の元素別溶出パターン分析

各試料の短期溶出試験、酸性化可能性試験結果、土研式雨水曝露試験における pH および浸出水濃度の変化パターンを表3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4に整理した。また図8に濃度変化パターンの判断例を示す。

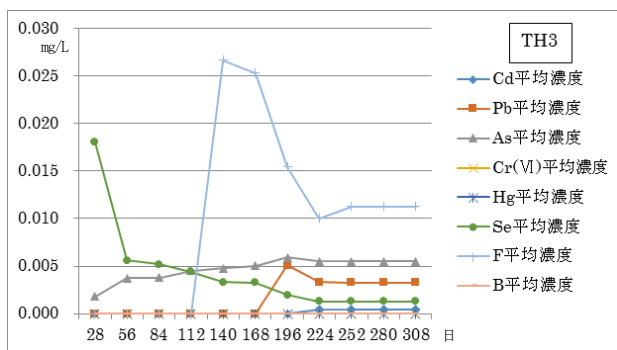
表3 各試料の短期溶出試験、酸性化可能性試験結果および土研式雨水曝露試験の浸出水濃度変化パターン

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		G		A	C	A			
TE	ペルム紀	頁岩	1736	-	8.3	<0.001	<0.001	0.006	0.002	<0.1	<0.1	弱塩基			A	A	A	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	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	トセライト(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	砂岩泥岩互層	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				
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	火山礫凝灰岩泥岩互層	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-砂岩	364	8.9	7.4	<0.0003	0.001	0.022	<0.001	0.31	<0.1	中性		C		C	E				
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				
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					
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				

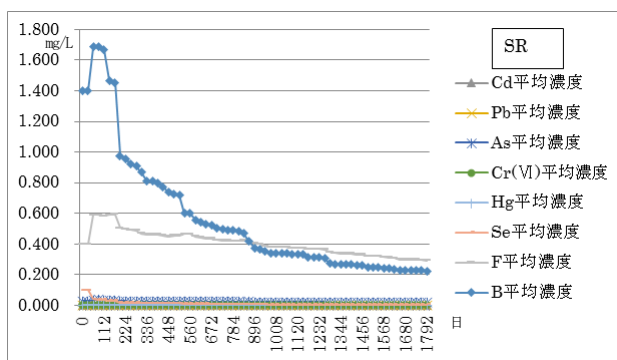
(注) 変動パターン A: 初期(200日以内)に最高濃度が得られ、その後1年以内に濃度が半減する。 B: 濃度ピークが得られた後に、濃度低減が緩やか。 C: 濃度がある時点から上昇。 D: 濃度が不規則に変化。 E: 濃度変化が比較的フラット。 **太字**は平均濃度が一時的に地下水環境基準値を満足しなかった試料。

表4 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

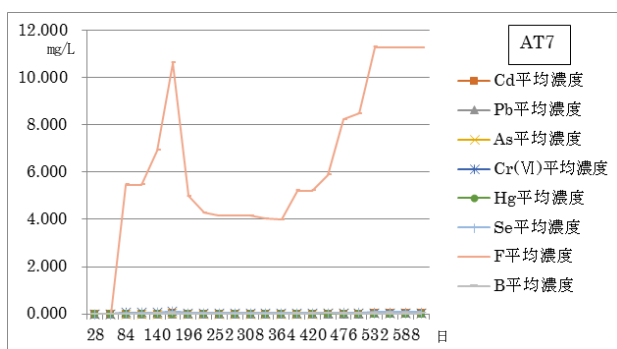
パターン	Cd	Pb	As	Se	F	B	計
A	4	5	9	23	12	15	68
B	2	0	4	2	4	2	14
C	6	16	8	6	15	0	51
D	1	3	1	1	2	1	9
E	3	0	8	1	4	3	19
計	16	24	30	33	37	21	161



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-8 曝露試験の平均濃度変化パターンの判断例

以下に、元素別の曝露試験結果の特徴を整理する。

1) カドミウム (Cd)

カドミウムは、浸出水 pH が3未満の強酸性条件下で溶出することがほとんどである。また、pH低下に伴って溶出濃度が増大しているように見えるもの(パター

ンCに分類される)が多く、溶出は止まりにくい傾向にある。今回分析した試料においては変質岩からの溶出が多かった。

2) 鉛 (Pb)

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

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

3) ヒ素 (As)

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

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

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あればパターンAが比較的多かった。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、個々のパターンは、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。

4. まとめ

平成28年度から平成30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連続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とヒ素、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を溶媒に連続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、As・Bの初期積算溶出量も最大値を示したことから、水素バブリングによる水素水を用いたバッチ溶出試験が還元環境を再現するバッチ溶出試験方法として有効である。

- 2) ヒ素を含む凝灰角礫岩ずり、軽石凝灰岩ずりおよび泥岩ずりを対象に、溶出操作の異なる繰返し溶出試験を行った結果、溶出操作の違いによるAs積算溶出量は、攪拌翼よりも水平振とうによる溶出操作が高い値を示し、試験前後試料の粒度試験結果から試料の粒子破碎が大きく影響したのと考えられた。
- 3) 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。

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

9.2 リサイクル材等の環境安全性評価・向上技術の構築

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

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質）

寒地基礎技術研究グループ（防災地質）

研究担当者：阿南修司、品川俊介、倉橋稔幸、田本修一

【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を試験溶媒として、盛土（酸化）と埋土（還元）を想定したバッチ吸着試験を開発・実施し、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。これらの結果、酸化還元電位が概ね 400 mV から 250 mV まで低下すると、天然材料へのヒ素の吸着性能が低下し、ホウ素の吸着性能が向上することを確認した。

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

キーワード：ヒ素、ホウ素、酸化還元電位、連続溶出試験、吸着試験、吸着層工法

1. はじめに

土壤汚染対策法の改正（H22.4 施行）により、自然由来重金属等を含む土壌が規制の対象になり、法対象外である岩石ずりも自主的に対応する事例が増えている。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、高額のコスト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。

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

2. 研究方法

2.1 盛土と埋土を想定したバッチ吸着試験

2.1.1 試料

溶媒作製に用いた試料は、北海道内のトンネル建設現場から採取した泥岩ずり 1 試料である。連続溶出試験の前処理として、試料を風乾後、ジョークラッシャーを用いて粉碎し、2 mm ふるいを通過したものをインクリメント法により分取後、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)	モリブデン青吸光度法 (JIS K0101 44.2)
カルシウム(Ca)	フレイム原子吸光法 (JIS K0102 50.2)
硫酸イオン(SO ₄)	イオンクロマトグラフ法 (JIS K0102 41.3)
酸化還元電位(Eh)	白金電極法 (1997版 河川水質試験方法(案) II-6)

2.1.2 吸着試験方法

蒸留水に泥岩ずりを液固比2の割合で投入し、環境庁告示第46号の付表で示される方法を準用した溶出試験により溶液を作製した。さらに、作成した溶液を、窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で蒸留水に1時間窒素バブリングを行い脱気水の吸着試験用溶液とした。同じく作製した溶液に電動歯ブラシ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を行い、水素水の吸着試験用溶液とした。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、初期濃度を把握する検液とした。

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

$$Q = kC^n \quad (1)$$

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

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。

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	

2.3 吸着層工法に関する文献調査

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

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

2.4 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-1に示す。同図中には吸着等温線を示す。Asでは、吸着量が0.18 ~35.9

mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.001~0.306 mg/Lを示した。脱気水溶液のOMの一部を除き、平衡液相濃度の増加とともに概ね吸着量も増加した。また、Bでは、吸着量が0.33~27.0 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.55~1.25 mg/Lを示した。Asと同様に平衡液相濃度の増加とともに吸着量が増加した。その結果を(1)式で近似した吸着等温線(図-1)の定数k、nおよびその決定係数R²を表-5に示す。図-1に示される5試料全ての吸着等温線について内挿計算可能な平衡液相濃度(As:0.1 mg/L、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-2に示す。図-2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Ehと吸着量との関係を図-3に示す。蒸留水溶液のEhは326~450 mVを示し、脱気水溶液のEhは265~389 mVを示した。蒸留水溶液と脱気水溶液のEhの差は、平均74 mVであった。蒸留水溶液と脱気水溶液の各天然材料の最大吸着量を比較すると、AsではOMを除きSNで2.58 mg/kg-dryから1.59 mg/kg-dry、KFで5.76 mg/kg-dryから0.52 mg/kg-dry、NSで23.4

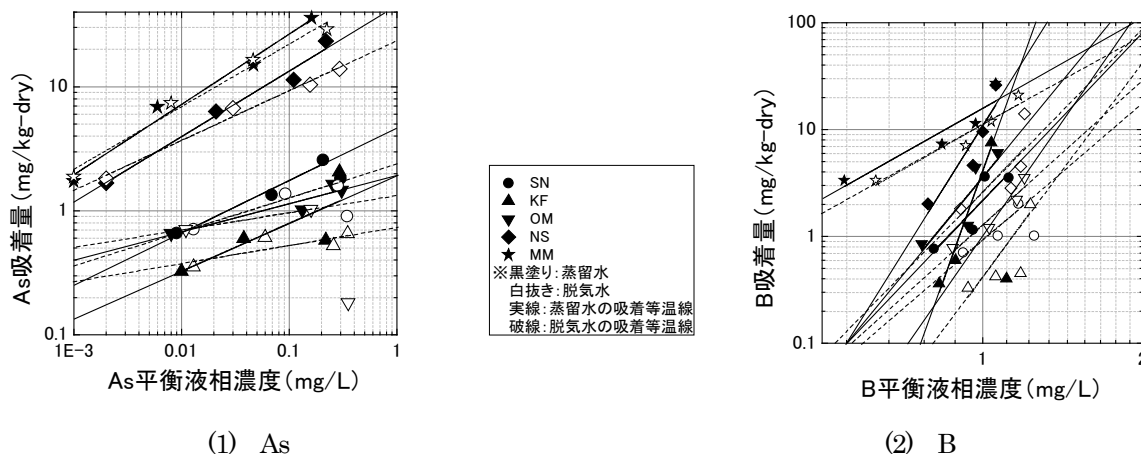
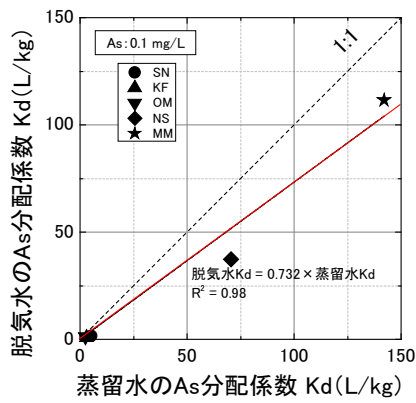


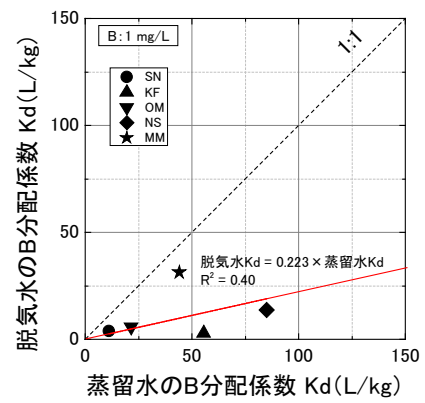
図-1 平衡液相濃度と吸着量との関係

表-5 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

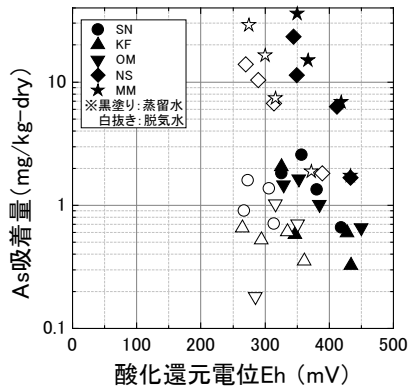


(1) As

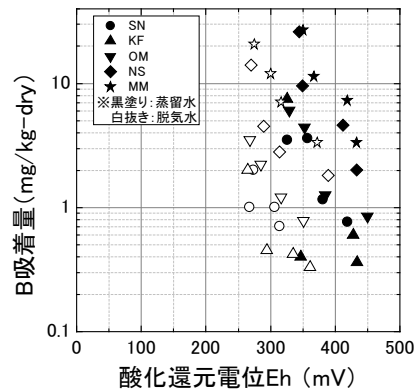


(2) B

図-2 蒸留水溶液の分配係数と脱気水溶液の分配係数との関係

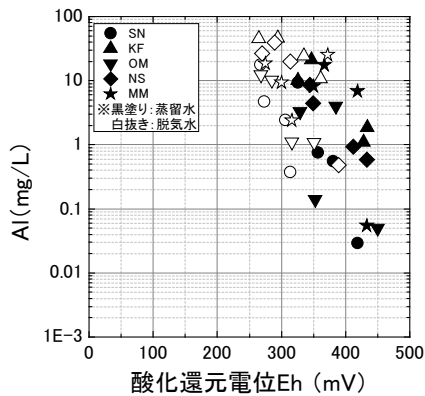


(1) As

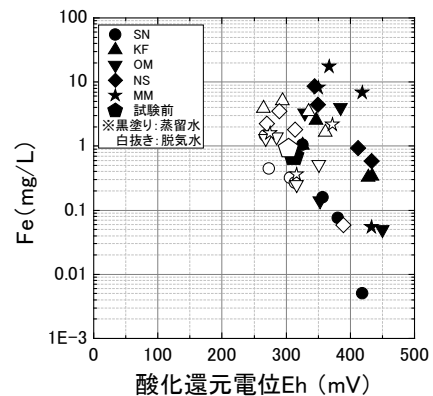


(2) B

図-3 吸着試験後 Eh と吸着量との関係



(1) Al



(2) Fe

図-4 吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係

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。

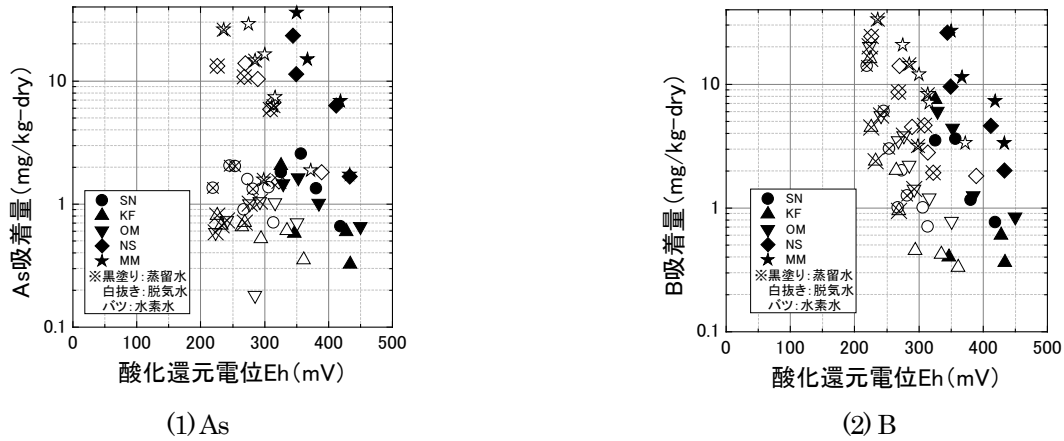


図-5 吸着試験後 Eh と吸着量との関係

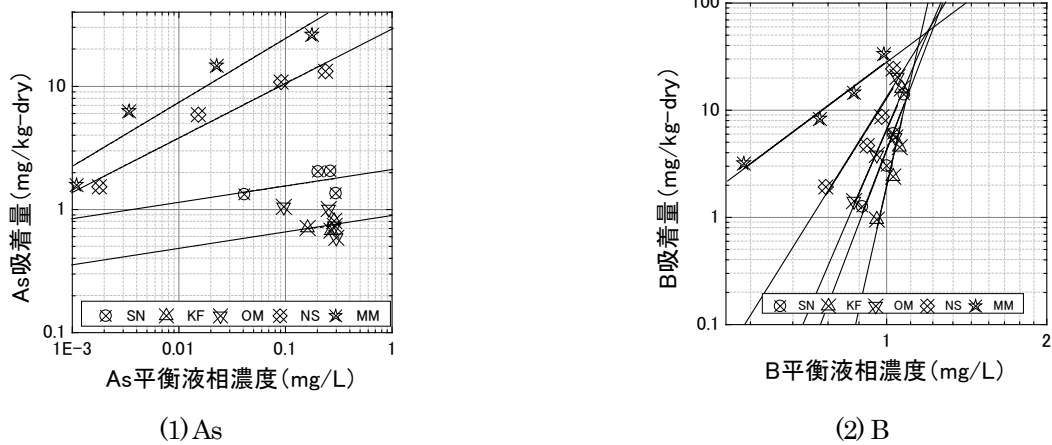


図-6 平衡液相濃度と吸着量との関係

また、吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係を図-4 に示す。酸化還元電位が低下すると、ほとんどの試料で Al と Fe が増加した。特に Al の増加量が多い。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、コロイドとなつ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 Eh と吸着量との関係を図-5 に示す。蒸留水溶液の Eh は 326 ~ 450 mV を示し、脱気水溶液

の 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を水素ガスバブリングにより吸着試験用溶液を作製することで、より還元的な環境を再現するバッチ吸着試験方法として有効であると考えられる。

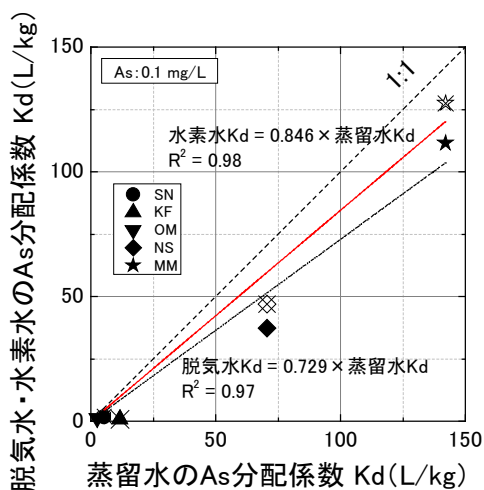
また、水素水溶液の平衡液相濃度と吸着量との関係を図-6 に示す。直線は吸着等温線を示す。As の吸着量が 0.60~26.1 mg/kg-dry を示し、平衡液相濃度は 0.001~0.301 mg/L を示した。平衡液相濃度の増加とともに概ね吸着量も増加した。また、B の吸着量が 1.0~33.2 mg/kg-dry を示し、平衡液相濃度は 0.50~1.10 mg/L を示した。As と同様に平衡液相濃度の増加とともに吸着量が増加した。その結果を(1)式で近似した吸着等温線(図-7)の定数 k、n およびその決定係数 R²を表-6 に示す。図-7に示される5試料全ての吸着等温線について内挿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

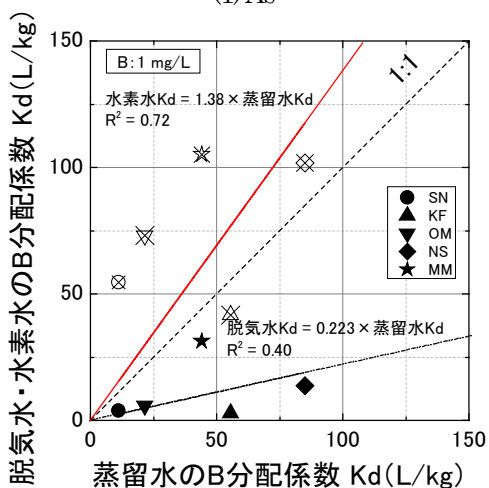
蒸留水溶液の分配係数と脱気水・水素水溶液の分配係数との関係を図-7 に示す。蒸留水溶液の K_d と比較して、脱気水溶液の K_d は A_s で約 70%程度、水素水溶液で約 85%程度であった。一方、 B では脱気水溶液で約 20%程度であったものが、水素水溶液では約 140%程度となった。これは酸化還元電位が低下すると、天然材料への A_s の吸着性能が低下するが、 B の吸着性能が向上すること

表-6 吸着等温式より求めた定数の一覧

試料	A_s			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



(1) A_s



(2) B

図-7 蒸留水溶液の分配係数と脱気水・水素水溶液の分配係数との関係

を示唆している。

3.3 吸着層工法に関する文献調査結果

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

浸透の不均等に対する対策として、カラム試験による実験的検討により、吸着層の上位に珪砂層を設けて、水の浸透を均質化することができるとの報告⁹⁾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),6),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-8)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。

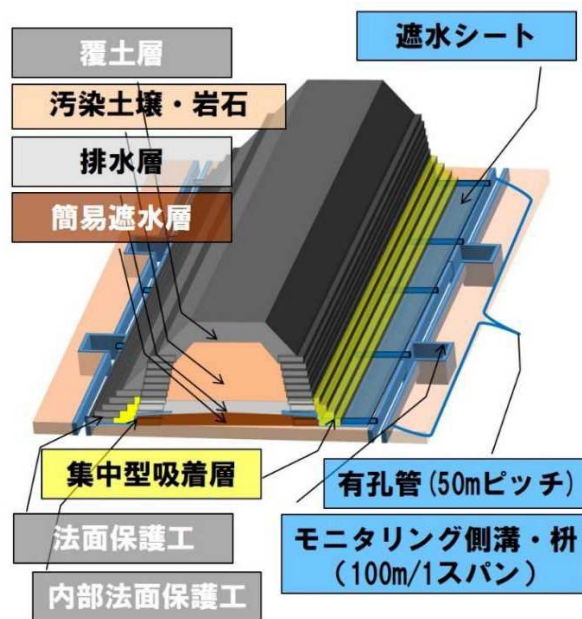


図-8 吸着層工法の盛土構造(案)⁸⁾

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-8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。

3.4 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-9および図-10のような構造を想定して解析メッシュを作成した。図-9は底面が水平、図

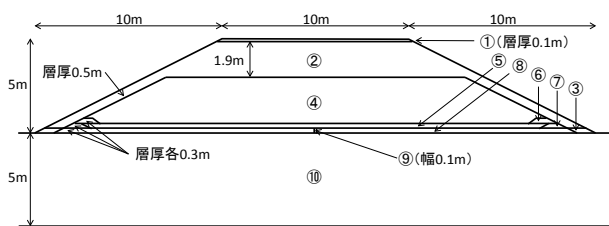


図-9 吸着層断面図（盛土1: 底面が水平な場合）

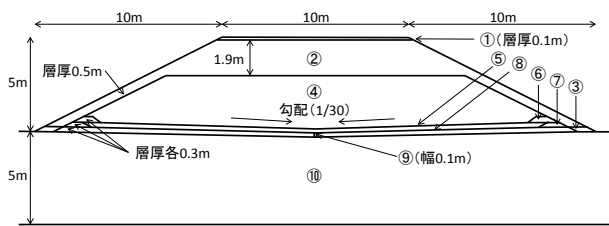


図-10 吸着層断面図（盛土2: 中心部が沈下した場合）

-10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-7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年度から平成30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を試験溶媒として用い、盛土（酸化）と埋土（還元）を想定した天然材料のバッチ吸着試験を実施した結果、蒸留水溶液の分配係数と比較して、脱気水溶液の分配係数はヒ素で約7割程度、ホウ素で約2割程度であった。また、より還元的な環境が再現できる水素水を溶媒に実験した結果、酸化還元電位が概ね400 mV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。

表-7 検討を行う吸着層断面構成

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

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) 吸着層工法における、盛土中の水の流れの不均衡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。
- 3) 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>
- 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>
- 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>
- 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>, 2017.
- 9) 龍原毅・直原俊介・巽隆有・五十嵐敏文：掘削ざりからのヒ素溶出対策のための吸着層設置位置の検討. 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.635-640, 2015.
- 10) 北海道環境保全技術協会技術委員会：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削度対策の設計・施工マニュアル. 84p., 北海道環境保全技術協会技術委員会, 2017.