

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）

1. 研究の必要性

循環型社会の実現に向け、各本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、平成 28 年度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

再生骨材コンクリートのアルカリ骨材反応（ASR）抑制対策について、現状の課題を整理し、旧ペースト中のアルカリ量が ASR に与える影響を確認する実験を実施した。また、再生細骨材の有効利用に向けて、密度および吸水率試験方法について検討した。さらに、再生骨材の吸水率等の品質が乾燥収縮に及ぼす影響を把握するため、吸水率を変えた再生粗骨材を用いたコンクリート供試体の乾燥収縮試験を開始した。また、再生骨材と普通骨材との混合使用時のコンクリートの品質変動を把握するため、各種物性値を調査した。

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・再生を複数回繰り返す、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アスファルト再生骨材の品質変動について調査するとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料および歩道路盤材としての適用性を検証するため、試験施工を実施した。その結果、アスファルト再生骨材は、北海道北部地域において凍上抑制層材料および歩道用路盤材として、切込砕石と同等の支持力が期待できる可能性が示唆された。

建設発生土については、「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」の改訂に盛り込むべき事項に関し、要対策土対応の目標設定から対応方法の選定までの流れについて、平成 28 年度の成果を踏まえて実務的な手順の検討を行った。その結果、発生土の搬出先のリスク評価結果と対策工法の選定を関連づけることで、従来よりも合理的な対応が可能な方法を提案した。

(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、組成の異なる再生用添加剤による再生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量を検証した。また、アスファルトフェームの分析を、より安全に実施するための抽出溶媒の検討を行った。その結果、再生用添加剤の種類によらず、再生アスファルト混合物でも中温化の効果が出ることが明らかとなった。また、代替溶剤を用いることで、より安全に分析できる可能性を見出した。

建設発生土に関する環境安全性については、自然由来重金属等を含む場合の評価手法、特に各種金属の溶出特性に関する検討を実施した。ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりを対象に、水素水を試験溶媒として用いた連続溶出試験を実施したほか、埋土（還元）を想定したバッチ吸着試験を実施した。その結果、ヒ素・ホウ素の溶出傾向は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、初期積算溶出量が増加することを確認した。また、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着性能は酸化還元電位が概ね 400 mV から 250 mV まで低下すると、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明らかにした。

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 2017, we conducted the research on freezing and thawing resistance performance and shrinkage properties of recycled aggregate concrete, performance evaluation of asphalt mixture with increasing repletion of recycling, development on basic principles of countermeasures for construction waste soil containing heavy metal derived from natural. It is shown that countermeasures to mitigate ASR for ordinary concrete can be also applicable for recycled aggregate concrete.

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、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る。28~29年度は、再生骨材コンクリートのアルカリ骨材反応（ASR）抑制対策について、現状の課題を整理し、旧ペースト中のアルカリ量がASRに与える影響を確認する実験を実施した。また、再生細骨材の有効利用に向けて、密度および吸水率試験方法について検討した。さらに、再生骨材の吸水率等の品質が乾燥収縮に及ぼす影響を把握するため、吸水率を変えた再生粗骨材を用いたコンクリート供試体の乾燥収縮試験を開始した。また、再生骨材と普通骨材との混合使用時のコンクリートの品質変動を把握するため、各種物性値を調査した。

キーワード：再生骨材、アルカリ骨材反応抑制対策、密度および吸水率試験、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2005~2007年に制定された。また、国土交通省においても2016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で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、再生細骨材の有効利用の検討が遅れている等、課題も多い。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。

29年度は、再生骨材コンクリートのASR抑制対策について、旧ペースト中のアルカリ量がASRに与える影響を確認する実験を実施した。また、再生細骨材の有効利用にあたっては、破碎製造時に発生する微粒の影響で、

密度および吸水率の測定が正しく行えないおそれがあり、その試験方法の妥当性について検討した。さらに、乾燥収縮への影響について基礎的な知見を得るため、同一の原コンクリートから吸水率を変えた再生粗骨材を作成し、これらを用いたコンクリートの乾燥収縮試験などを行い、比較検討を行った。また、再生骨材と普通骨材との混合使用時のコンクリートの品質変動を把握するため、圧縮強度や乾燥収縮、塩分浸透抵抗性等を調査した。

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 400kg/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

表-2.1 再生骨材コンクリートのASR抑制対策

原コンクリート	明らかにASR反応など骨材に起因する変状が生じているものを使用してはならない
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)等を使用
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)等を使用し、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)等を使用し、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)等を用い、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)等を用い、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)等を用い、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

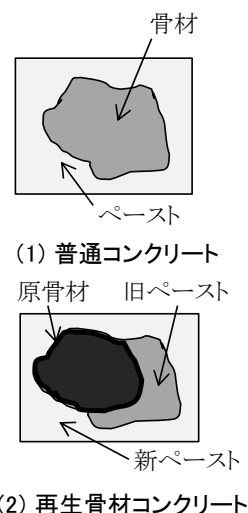


図-2.1 普通コンクリートと再生骨材コンクリート

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、一般には不特定多数の解体現場から搬入される。このため原骨材を全て特定して、(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-2.1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-2.1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Lを用いたコンクリートは、構造体に使用しないコンクリートであることから、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。

構造体に用いる可能性のある再生骨材コンクリート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。このため、再生骨材コンクリートHに比較して、同じ抑制対策でカバーできる単位セメント量の範囲が少ない範囲に限定されてしまう。Mの抑制対策が表-2.1に示すように煩雑なのはそのためである。しかしながら、旧ペースト中のアルカリの影響³⁾については、必ずしも十

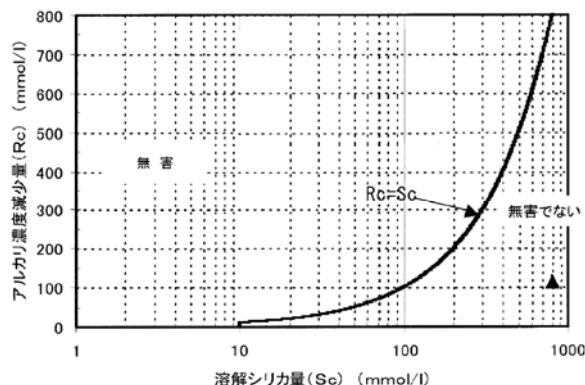


図-2.2 原骨材のASR反応試験結果(化学法)
(文献1)のデータを一部修正)

分な量の検証データがあるとは言い難い。そこで、再生骨材コンクリートのASR抑制対策の合理化の可能性を捉える実験を行った。具体的には、図-2.1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-2.2に示す。

原コンクリートの配合を表-2.2に示す。コンクリートは約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。

表-2.2 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 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	アルカリ量 Na ₂ O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-2.3 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

この原コンクリートを破碎し、再生骨材 M に相当する骨材を製造した。また、可能な限り旧ペーストを除去し、反応性原骨材を取り出した。再生骨材の製造は、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、コンクラッシャーで2次破碎して製造した。反応性原骨材の取り出しは、再生骨材をさらにロッドミルに投入して行った。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、反応性原骨材に付着した全てのペーストを完全に除去できたわけではなく、多少のペーストが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-2.3に、外観を写真-2.1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-2.4)。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-2.3)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」を参考に行うこととした。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合で最もアルカリ量が少ない配合は表-2.4 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。



写真-2.1 再生骨材と原骨材

表-2.4 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

このため、Na₂O 当量で 2.7kg/m³ 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-2.4 の組み合わせでコンクリートを練り混ぜ、100×100×400mm の供試体を 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

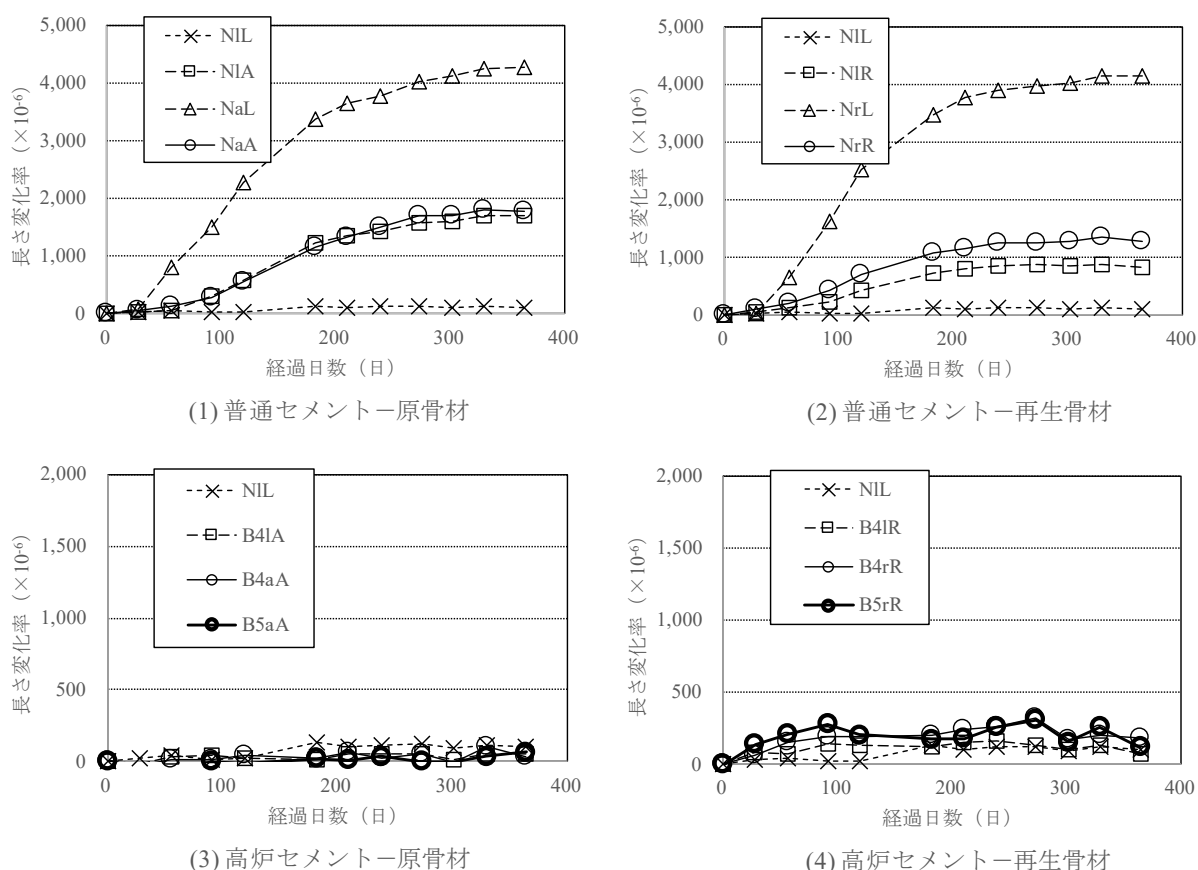


図-2.3 長さ変化測定結果

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。

28年度に、コンクリート供試体の製造までを行い、29年度は、1ヶ月ごとに供試体の長さ変化とひび割れの発生状況を測定した。

2.3 実験結果

長さ変化の試験結果を図-2.3に示す。

普通セメントと反応性原骨材の組み合わせが図-2.3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-2.3の(2)は(1)と同様の条件で反応性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。

(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。

現在、再生骨材コンクリートのASR抑制対策は、旧ペースト中のアルカリ量を考慮して普通コンクリートよりも厳しい基準となっているが、再生骨材コンクリートの抑制対策も普通コンクリートと同様としてよい可能性がでてきた。

3. 再生細骨材の密度および吸水率試験方法の検討

3.1 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リング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、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（コンクリート用砕石砕砂）やJIS A 5023（再生骨材Lを

用いたコンクリート)の規定では、JIS A 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 (危険側に) 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²⁾。

3.2 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-3.1に示す方法で原コンクリートを破碎し、再生細骨材各1tを製造した。なお、破碎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。粒度分布を図-3.1に示す。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、JIS A 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。

電気抵抗法は含水率の異なる試料を複数準備し、それらを、銅板を両端面に配置した容器に詰め、試料の電気抵抗値を測定するものである。試験装置を写真-3.1に示す。電気抵抗値は、含水状態が表乾以下だと含水率に応じて大きく変化する、表乾を超えると低い値に安定する性

表-3.1 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碎	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			

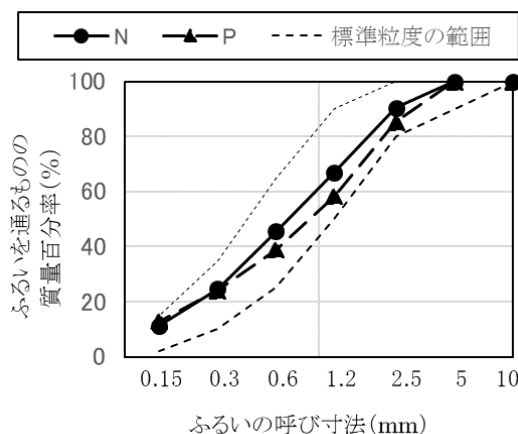


図-3.1 再生細骨材の粒度分布



写真-3.1 電気抵抗法の試験装置

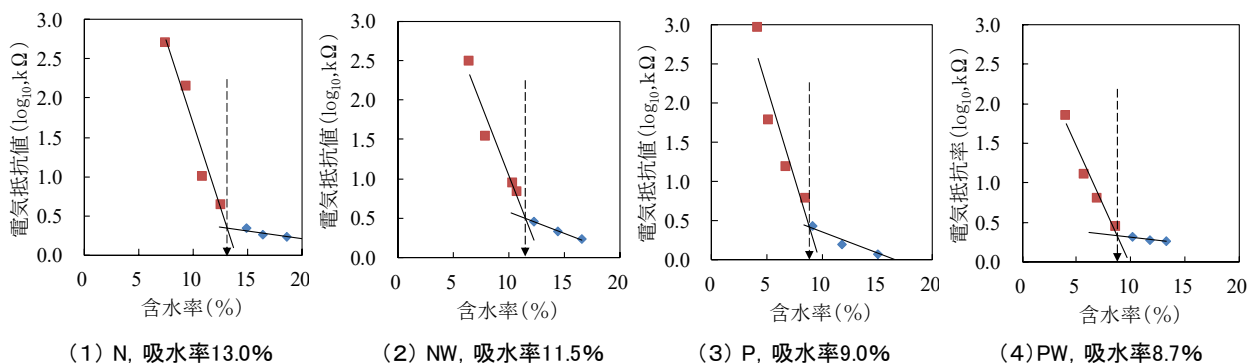


図-3.2 電気抵抗法の測定結果

質があり、その境界の状態を表乾、そのときの含水率を吸水率と判定する (図-3.2)。

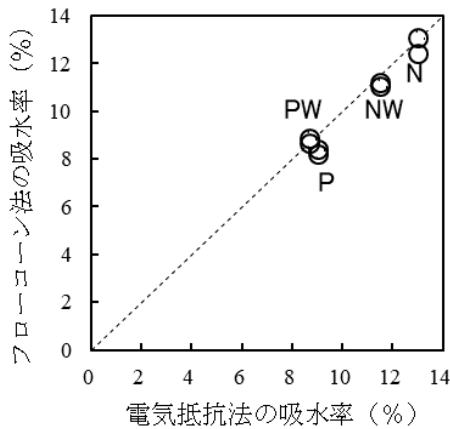


図-3.3 吸水率の比較

3.3 実験結果

電気抵抗法の測定結果を図-3.2に示す。各グラフの2本の線分の交点が表乾となる。この結果とフローコーン法から得られた結果との比較を図-3.3に示すが、両者の値は良く一致した。

実験を行う前は、微粒分中の影響で、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、特に測定上の困難は生じなかった。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。

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、乾燥収縮が大きくなるとされている。そのため、鉄筋拘束率が高い構造物に再生骨材を使用した場合、乾燥収縮によりひび割れが発生し、構造物の耐久性に影響を及ぼすことが懸念される。

そこで、平成 29 年度は、旧モルタル分が乾燥収縮へ及ぼす影響について基礎的な知見を得るため、同一の原コンクリートから3水準の吸水率を有する再生粗骨材を準備して乾燥収縮試験などを行い、比較検討を行った。

4.2 使用材料と配合

実験に使用する再生粗骨材の一覧を表-4.1に示す。再生粗骨材は、2つの製造箇所それぞれで3水準の吸水率の試料を準備し、計6種類とした。仙台は昭和49年、石狩は昭和45年に施工された建築物の解体材である。今回、再生粗骨材は、2箇所それぞれの原コンクリートに対して、吸水率が3水準となるよう、破碎回数の追加

表-4.1 再生粗骨材の一覧

記号	産地	骨材寸法 (mm)	品質区分	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	微粒分量 (%)	FM凍害指数
仙7.5	仙台	5-20	規格外	7.51	2.26	0.3	0.07
仙6.5		5-20	L	6.47	2.32	0.2	0.05
仙5.5		5-20	M	4.53	2.44	0.3	0.03
狩6.7	石狩	5-20	L	6.67	2.27	1.4	0.10
狩5.7		5-20	L	5.74	2.33	0.8	0.02
狩4.6		5-20	M	4.62	2.41	0.9	0.03

表-4.2 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (%/C)		スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	減水剤	AE剤		
仙7.5	55	45.0	154	280	846	945	0.14	0.0019	12.8	5.5
仙6.5	55	45.0	154	280	846	960	0.14	0.0019	12.0	5.8
仙5.5	55	45.0	154	280	846	983	0.00	0.0035	10.0	5.8
狩6.7	55	45.0	154	280	846	941	0.26	0.0008	13.5	5.3
狩5.7	55	45.0	154	280	846	949	0.20	0.0013	13.7	5.5
狩4.6	55	45.0	154	280	846	976	0.07	0.0024	13.0	5.9

や擦り磨き等の処理を行い、吸水率4~7%の粗骨材を準備した。

細骨材は苫小牧市錦多峰産の除塩海砂(表乾密度2.45g/cm³, 吸水率1.19%)を使用した。セメントは高炉セメントB種(密度3.05g/cm³, 比表面積3,770cm²/g)を使用した。また、混和剤には一般的な減水剤(ポリカルボン酸系化合物)を用い、AE剤は樹脂酸塩系のものを用いた。

コンクリートの配合を表-4.2に示す。配合の記号は、骨材の製造箇所と吸水率との組み合わせで示している。水セメント比は全て55%とし、目標スランプは12±2.5cm、目標空気量は4.5±1.5%とした。

4.3 試験方法

圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠し、φ10×20cm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JIS A 1129-1(コンパレータ法)に準拠し、材齢7日目から開始した。本報告では3ヶ月目までの測定経過を示す。

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。

4.4 試験結果

4.4.1 圧縮強度試験

圧縮強度の試験結果を図-4.1に示す。いずれの配合でも、骨材の種類による大きな違いは見られない。

静弾性係数の試験結果を図-4.2に示す。仙台製の再生骨材では、吸水率が低くなるほど静弾性係数が大きくなった一方で、石狩製の再生骨材では、吸水率による明確な差は確認できなかった。

4.4.2 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験によって得られた長さ変化率を図-4.3, 4.4に示す。静弾性係数の場合と同様に、仙台製の再生骨材では吸水率による差が見られた一方で、石狩製の再生骨材では、同程度の値となった。このことから、再生粗骨材を使用したコンクリートでは、旧モルタルの量だけではなく、旧モルタルの質も乾燥収縮に影響している可能性がある。

図-4.5に再生粗骨材の吸水率と、材齢3か月時点の長さ変化率との関係を示す。吸水率の増加に伴い、長さ変化率が比例的に増加する傾向が見られた。また、今回の調査の範囲では、乾燥材齢3か月時点の途中経過ではあるが、収縮量が大きい場合でも、吸水率3%増に対して100μ増程度と小さな値であった。

図-4.6に材齢28日におけるコンクリートの静弾性係

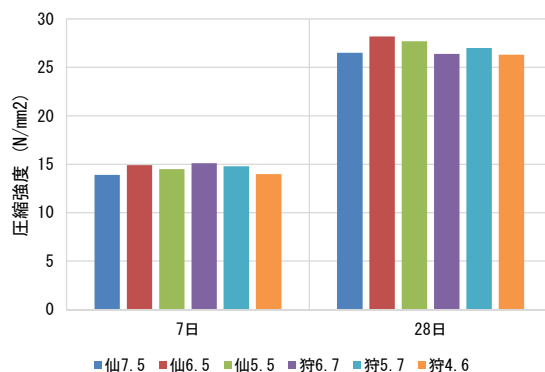


図-4.1 圧縮強度

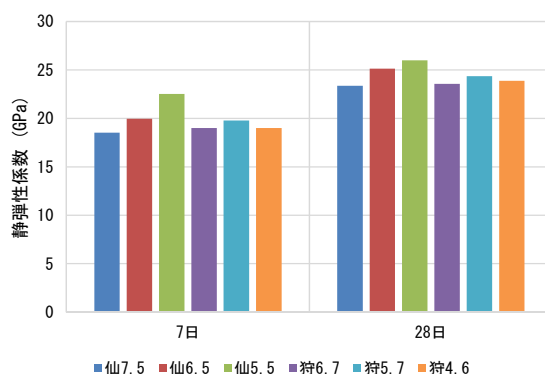


図-4.2 静弾性係数

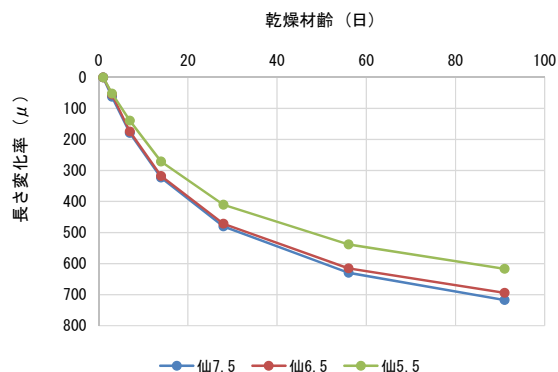


図-4.3 長さ変化率 (仙台産再生骨材)

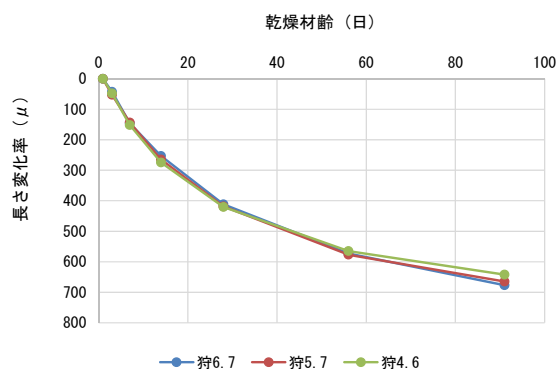


図-4.4 長さ変化率 (石狩産再生骨材)

数と、材齢3か月時点の長さ変化率との関係を示す。普通骨材に関する既往調査³⁾では、コンクリートの静弾性係数が高い場合ほど、長さ変化量が少なくなることが報告されている。今回の実験における静弾性係数の範囲が狭いため、今後の検証が必要であるものの、概ね、同様の傾向となっていることから、再生粗骨材の場合でも、静弾性係数から長さ変化量を予測できる可能性がある。

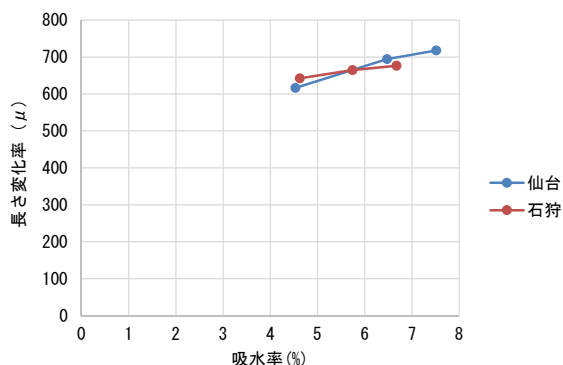


図-4.5 吸水率と長さ変化率の関係

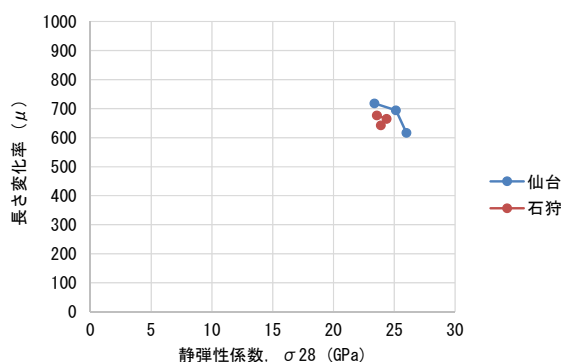


図-4.6 静弾性係数と長さ変化率の関係

今後、様々な再生骨材を準備し、旧モルタルの量と質が乾燥収縮に及ぼす影響や、静弾性係数との相関を調査していきたい。

5. 混合使用時のコンクリートの品質変動実態の把握

5.1 研究概要

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。このような中、再生骨材Lと普通骨材の混合使用時の品質変動に関する知見を得ることが重要となる。本研究で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相当の再生骨材と普通骨材（安山岩、石灰石）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-5.1 に使用材料の一覧を示す。再生骨材は表-4.1 に示す狩6.7と同じ材料である。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-5.1 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)	小樽市見晴産碎石 (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)	函館市義朗産碎石 (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-5.2 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤 (%/C)		スランブ (cm)	空気量 (%)			
			W	C	S	減水剤	AE剤					
B55-安100	55	45.0	154	280	846	1035	-	-	0.24	0.0020	10.0	4.3
B55-安67再33						691	-	314	0.28	0.0013	10.0	4.3
B55-安33再67						345	-	627	0.36	0.0010	11.1	4.7
B55-灰100						-	1045	-	0.00	0.0031	13.2	4.7
B55-灰67再33						-	697	314	0.08	0.0029	14.0	5.5
B55-灰33再67						-	348	627	0.18	0.0018	13.0	5.1
B55-再100						-	-	941	0.33	0.0010	11.0	5.5
B40-安100	40	41.0	156	390	729	1050	-	-	0.43	0.0022	10.5	5.0
B40-安67再33						701	-	318	0.50	0.0016	11.2	5.5
B40-安33再67						350	-	636	0.49	0.0010	10.0	4.9
B40-灰100						-	1061	-	0.15	0.0025	11.6	4.6
B40-灰67再33						-	707	318	0.34	0.0015	12.0	4.9
B40-灰33再67						-	354	636	0.42	0.0010	10.3	4.9
B40-再100						-	-	955	0.45	0.0010	8.5	5.4

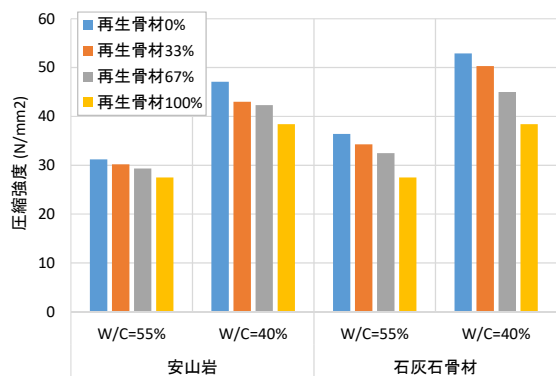


図-5.1 圧縮強度

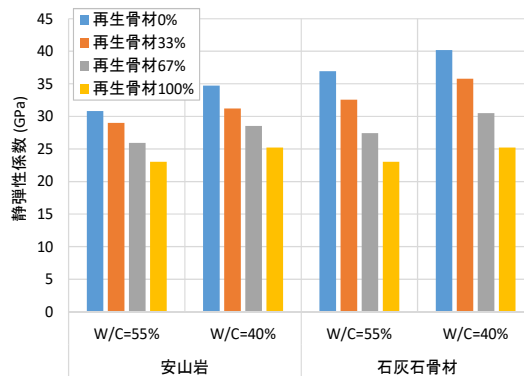


図-5.2 静弾性係数

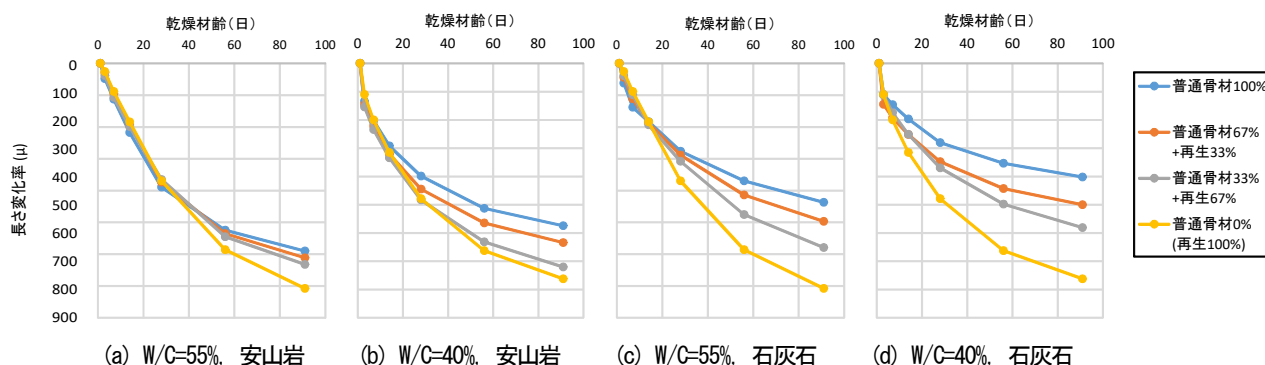


図-5.3 長さ変化率

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-5.2 に示す。水セメント比は 40%と 55%の 2 種類とし、目標スランプは 12±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5%とした。

5.3 試験方法

圧縮強度試験、静弾性係数試験、乾燥収縮試験および養生方法は、4.3 節と同様である。

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 の浸漬試験を材齢 28 日より開始している。現在、浸漬試験は試験途中であるため、本報では電気泳動試験による実効拡散係数について報告する。

5.4 試験結果

5.4.1 圧縮強度試験

図-5.1 に材齢 28 日における圧縮強度の試験結果を、図-5.2 に静弾性係数の試験結果を示す。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していった。また、その低下の程度は、圧縮強度、静弾性係数ともに、使用割合に対して一様であることから、品質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-5.3 に示す。いずれの配合でも、乾燥開始 7 日程度の初期で

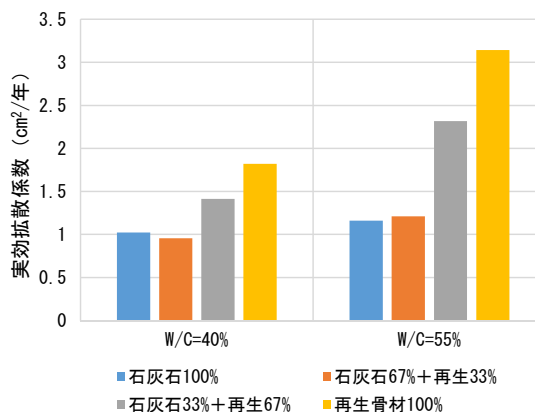


図-5.4 実効拡散係数

は普通骨材の長さ変化率が大きい。この要因としては、再生骨材の吸水率が大きいため、練混ぜ時に粗骨材が保持する水分量に差が生じ、乾燥開始直後において再生骨材からモルタル分へ水分を供給することで初期の長さ変化を緩和している可能性が考えられる。その後、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 3 か月経過時点では、全ての再生骨材において長さ変化率の増加量が普通骨材より大きくなった。

また、圧縮強度や静弾性係数と同様に、乾燥収縮量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た。このことから、石灰石骨材等の乾燥収縮量の小さ

い骨材と再生骨材とを混合使用することによって、乾燥収縮への対応策の1つとできる可能性がある。

5.4.3 塩分浸透抵抗性

電気泳動試験から得られた塩化物イオンの実効拡散係数を図-5.4に示す。少量混合時(33%程度)には、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、実効拡散係数も増大した。既往の報告⁴⁾では、高炉セメントB種を使用したコンクリートの実効拡散係数は0.13~0.17 cm²/年とされており、今回の試験結果は非常に大きな値となっている。今後、浸漬試験の結果と比較することで試験結果の妥当性を確認するとともに、混合使用した場合の塩分浸透抵抗性を確認していきたい。

6. 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、今回の実験結果から、普通コンクリートと同様としてよい可能性がでてきた。

(2) 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。

(3) 再生粗骨材による乾燥収縮試験では、旧モルタルの量の他に、旧モルタルの質も影響している可能性がある。

(4) 再生骨材Lと普通骨材を混合使用した場合、圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮は、混合割合に応じて一様に変化する。

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、平成17年6月
- 2) 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、平成30年8月(投稿中)
- 3) 渡辺博志、片平博、伊佐見和大、山田宏：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究、土木研究所資料4199号、2011.3
- 4) (社)セメント協会：各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート専門委員会報告F-55, 2008.3

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、木村孝司（上席）、丸山記美雄、安倍隆二、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29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アスファルト再生骨材の品質変動について調査するとともに、アスファルト再生骨材の凍上抑制層材料および歩道路盤材としての適用性を検証するため、試験施工を実施した。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30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25年度の統計では、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47%、関東地方58%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29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アスファルト再生骨材について調査するとともに、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としての適用性を検証するため、試験施工を実施した。

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を劣化させた後、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。

2.2 試験方法

2.2.1 試験手順

試験手順を図-1に示す。新規のアスファルト（以下、

ORG) を試験室内で劣化・再生を繰り返し、性状変化を確認するため材料性状試験を行った。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。なお、繰り返し劣化再生による性状変化を際立たせるために、本試験の再生アスファルトは、新規アスファルトを追加しない、いわゆる100%再生で実施した。

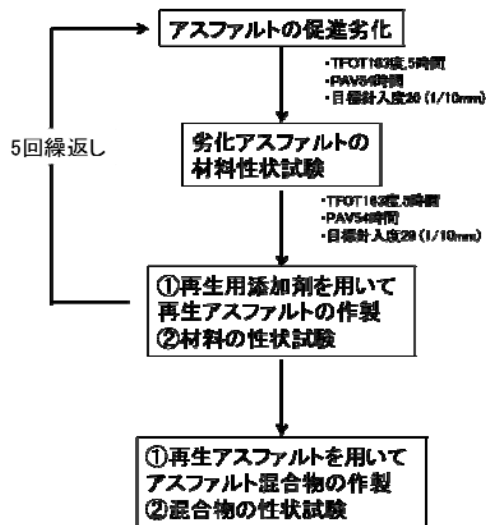


図-1 試験手順

2.2.2 試験材料の性状

アスファルト(ORG)は舗装用石油アスファルト60/80を用いた。また、再生用添加剤は国内で流通しているもので、実際のアスファルトプラントで実績のあるものを2種類使用した。添加剤Aは芳香族分が比較的多いものであり、添加剤Bは飽和分が多いものとして採用した。アスファルトおよび再生用添加剤の性状を表-1に示す。混合物は、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。混合物の合成粒度を表-2に示す。

2.2.3 試験方法

試験項目を表-3に示す。アスファルトの材料性状試験として、物理性状である針入度試験、軟化点試験および伸度試験を行い、動的粘弾性状としてダイナミックシアレオメータ試験(以下、DSR試験)を行った。各試験は、舗装調査・試験法便覧²⁾に準拠して行った。DSR試験は、測定温度の範囲は0℃から60℃までとした。広範囲の温度領域で測定を行うため、それぞれの温度で適切な大

表-1 使用材料の性状

	ストレートアスファルト 60/80		添加剤A	添加剤B
密度 (g/cm ³)	1.037	密度 (g/cm ³)	0.975	0.909
針入度 (1/10mm)	70	組成 (%)	アスファルテン分	0.1
軟化点 (°C)	46.5		レジ分	6.1
伸度 (cm)	100+		芳香族分	88.1
			飽和分	47.7
			5.7	49.9

表-2 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

表-3 試験項目

材料試験	性能指標等	混合体試験	性能指標等
針入度試験	コンシステンシー	圧裂試験	ひび割れ
軟化点試験	軟化温度	ホイールトラッキング試験	わだち割れ
伸度試験	延性、ひび割れ	小型曲げ試験	離化点
赤外線光度測定	酸化劣化	高温カンタプロ試験	骨質集積量
組成分析試験	四成分割合		
DSR試験	動的粘弾性状		
スラッジ試験	溶解性		

きさの治具(パラレルプレート)を使用した。また、測定温度領域の中間温度にてあらかじめひずみスイープ試験を行い、得られた線形限界値をもって本試験のひずみ条件とした。化学性状として赤外吸光度測定、組成分析試験(TLC/FID法)³⁾を行った。さらに、再生アスファルトの再生用添加剤および旧アスファルトの内成分の溶解性・分散性を調べる目的で、ドライスラッジ(以下、スラッジ)量を測定した。この試験は、重油中のスラッジ量を定量する試験⁴⁾を、再生アスファルト中の粒子状物質の定量評価をするために応用したもの⁵⁾である。測定条件を表-4に示す。

一方、混合物試験は、圧裂試験、ホイールトラッキング試験、小型曲げ試験および高温条件下でのカンタプロ試験(以下、高温カンタプロ試験)を行った。圧裂試験およびホイールトラッキング試験の試験方法は、舗装調

査・試験法便覧に準拠した。試験条件は、圧裂試験は試験温度 0、20、60℃の各試験温度での試験回数 n=3 である。ホイールトラッキング試験は、試験温度 60℃、試験回数 n=1 である。また、小型曲げ試験は既存文献⁹⁾の方法で実施し、載荷速度 10mm/min、試験温度 -10、-5、0、5、10、15℃の 6 条件である。また、高温カンタブロ試験を行うにあたっては、まず予備試験において、表-5 に示す通り、供試体の温度を 0~60℃とし、ロサンゼルス試験機内の温度（以下、試験機温度）を供試体温度別に 0~30℃として実施した。予備試験の結果、供試体温度を 60℃、試験機温度を 30℃とした条件において、再生アスファルト混合物の損失量が大きくなったため、これを高温カンタブロ試験の条件とした。

表-4 スラッジ量試験条件

再生アスファルト:添加剤比		1:9
加熱温度 (℃)	添加剤B 再生4	130
	添加剤B 再生5	180
	上記以外	200
吸引温度		130
ろ過フィルター細孔径(μm)		1.6(Whatman GF/A)
吸引圧(MPa)		0.04(絶対圧力)
混合条件		ガラス棒により再生アスファルトが溶解するまで

表-5 カンタブロ試験の予備試験の条件

供試体温度(℃)	0~60
ロサンゼルス試験機内の温度(℃)	0~30
ドラム回転数	毎分 30~33 回転で 300 回転

2.3 試験結果

2.3.1 アスファルト材料性状

(1) 再生アスファルトの混合割合

アスファルトの劣化・再生を繰り返した際の、再生アスファルト中の ORG の割合と再生用添加剤の添加割合を表-6 に示す。本実験では、劣化アスファルトを再生する際、新規のアスファルトを加えず再生用添加剤のみ用いた(100%再生)ため、再生5では再生用添加剤の割合が多くなっている。

(2) 基本物理性状

針入度および軟化点の推移を図-2 および図-3 に示す。再生用添加剤 B は、繰返し劣化再生が進むにつれて、同じ劣化条件でも針入度 20 に達しないようになった。再生

する際には、針入度 70 前後になるように再生用添加剤の添加量を調整した。軟化点については、再生用添加剤 B の方が軟化点の上昇幅が大きくなり、劣化4以降では軟化点が 100℃を越える結果となった。

次に、伸度の測定結果を図-4 に示す。伸度は再生1から 1,000mm まで回復せず、添加剤 A については再生3回以降ではほとんど回復しない結果となった。一方、再生用添加剤 B は再生1の時点からほとんど回復が見られなかった。

表-6 再生アスファルトの構成

a)再生用添加剤 A

	再生1	再生2	再生3	再生4	再生5
添加割合	18.30%	17.56%	9.20%	12.80%	12.80%
旧アス割合	81.70%	67.35%	61.16%	53.33%	46.50%

b)再生用添加剤 B

	再生1	再生2	再生3	再生4	再生5
添加割合	12.85%	13.68%	15.55%	14.24%	8.51%
旧アス割合	87.15%	75.23%	63.53%	54.48%	49.85%

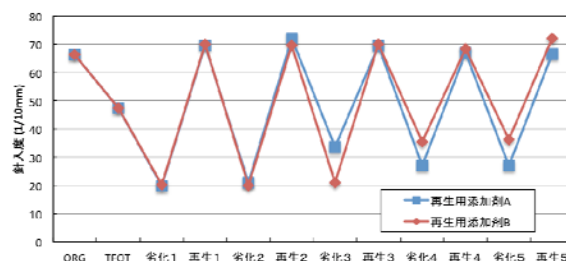


図-2 針入度

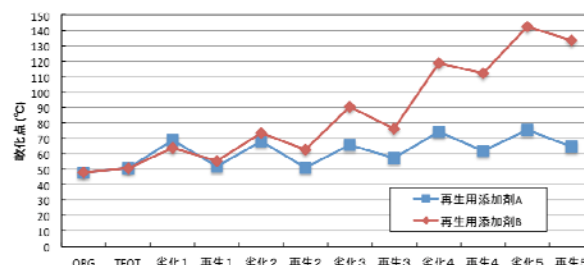


図-3 軟化点

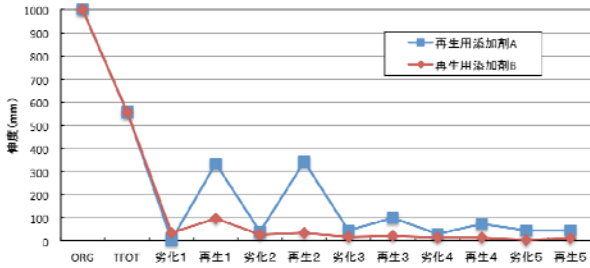


図-4 伸度

(3) 化学性状

赤外吸光度測定結果としてカルボニルインデックスの推移を図-5に示す。繰返し劣化・再生を行う毎にカルボニルインデックスは徐々に増加した。その増加傾向は、一定の値に収束する傾向が見られた。この傾向に、添加剤の違いは認められなかった。

次に、TLC/FID法によるアスファルトの組成分析試験結果を図-6に示す。どちらの再生用添加剤でも繰返し劣化再生に伴い、芳香族分が減少する傾向を示した。しかし、再生用添加剤Bでは、飽和分の増加が著しく、再生5回目の組成分は添加剤Aによる再生アスファルトやORGとの違いが明確なものとなった。

組成成分の結果に基づき、コロイダルインデックスを算出した結果を図-7に示す。コロイダルインデックスとは、飽和分およびアスファルテン分の合計を、芳香族分およびレジン分の合計で除した値であり、数値が高いとアスファルテンが凝析しやすくなる傾向を示す。再生用添加剤Aのコロイダルインデックスは、再生で微減、劣化で微増しており、再生5回目の時点でORGとほぼ同値であった。そのため、添加剤Aによる再生アスファルトの相溶性はORGに近いと考えられる。一方、再生用添加剤Bでは、再生4回目から飽和分と芳香族分の割合が逆転した影響により、コロイダルインデックスが急激に増加した。したがって、再生4回目以降ではアスファルテンのような高分子物質がアスファルト内で分散できず、相溶性が悪化していることが示唆された。

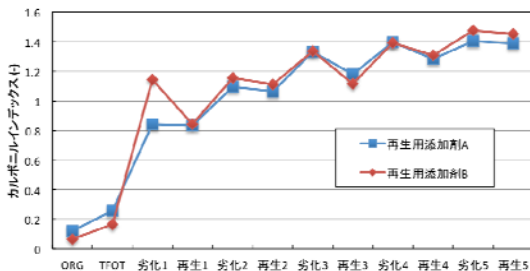
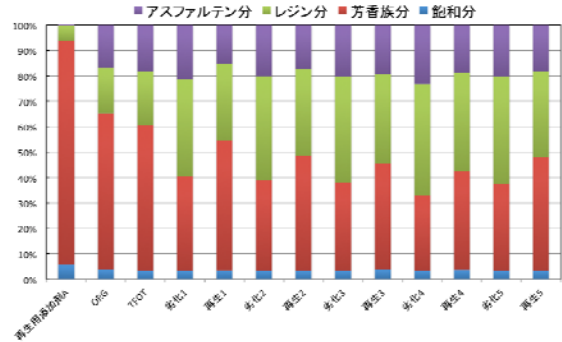
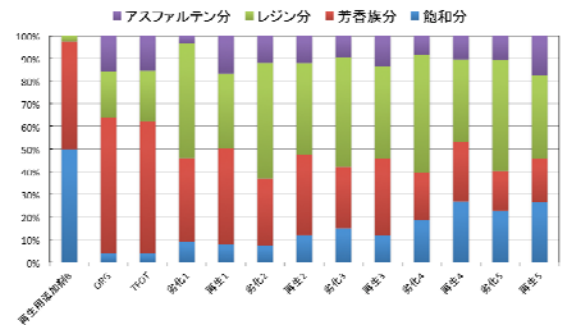


図-5 カルボニルインデックス



a)再生用添加剤A



b)再生用添加剤B

図-6 組成分析結果

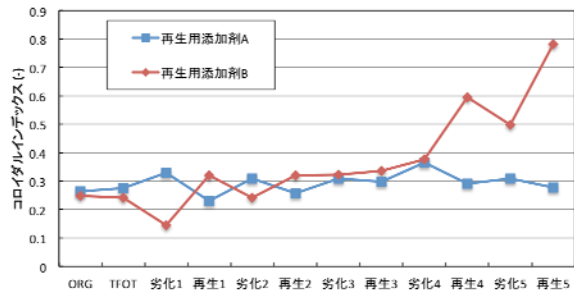


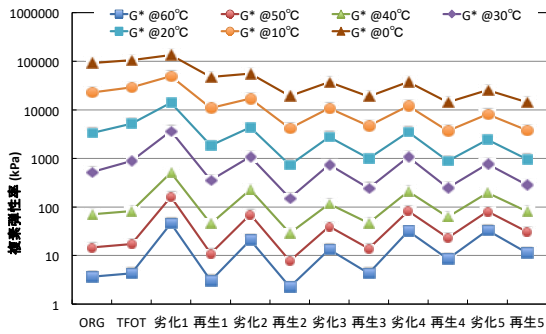
図-7 コロイダルインデックス

(4) 動的粘弾性状

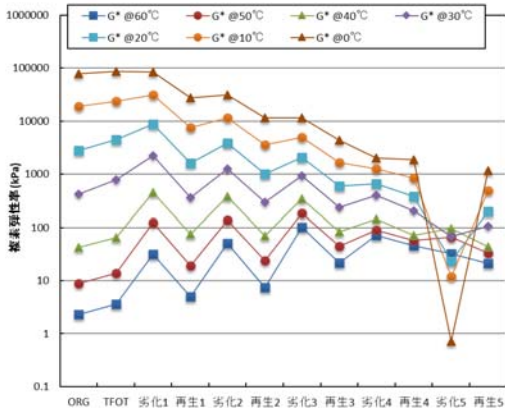
アスファルトの物理性状として動的粘弾性状を評価した。周波数10rad/sでの複素弾性率を図-8に示す。高温域ではアスファルトが軟らかいため、複素弾性率は低く、温度の低下に伴いアスファルトが硬くなるため複素弾性率は高い値を示した。繰返し再生により、低温での複素弾性率は徐々に低下し、高温では徐々に増加した。そのため、5回目の再生時には60℃と0℃の複素弾性率の差が、初期の状態と比べて小さくなった。つまり、感温性が鈍くなっており、伸度と同様の傾向が得られたことになる。高温領域での結果だけを見れば、徐々に硬化することは劣化することを意味しており、実道にてひび割れを誘発するおそれがある。一方、再生用添加剤Bの方で

も同様の傾向が確認されたが、再生用添加剤 A よりも早い段階で複素弾性率の差が小さくなり、また、ある程度の複素弾性率の範囲に収束していた。

位相角の推移を図-9 に示す。再生用添加剤 A の場合、複素弾性率と同様に、繰返し再生によって位相角の温度差は小さくなる傾向を確認した。また、繰返し再生に伴い、位相角は 30°~60°の間に収束する傾向が見られた。中間値に相当する 45°は弾性的性質と粘性的性質を分ける境界値であり、繰返し再生によってアスファルトが中間的な性質を示すことが示唆された。再生用添加剤 B では劣化 3 回目以降から値にばらつきがあり、明確な傾向は見出せなかった。なお、劣化 3 回目以降の再生アスファルトは、動的粘弾性状試験の治具との付着性が低下する様子が見られ、これがばらつきの原因となっている可能性が示唆された。

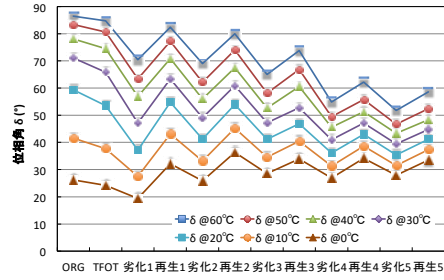


a)再生用添加剤 A

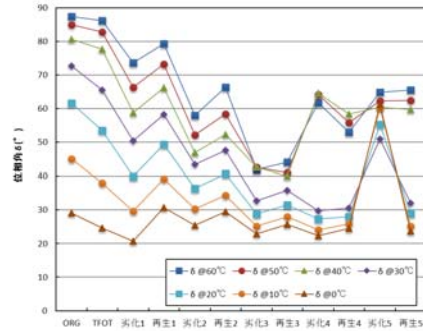


b)再生用添加剤 B

図-8 複素弾性率の推移



a)再生用添加剤 A



b)再生用添加剤 B

図-9 位相角の推移

(5) スラッジ量

スラッジ発生量を図-10 に示す。なお、添加剤 A の再生アスファルトはいずれの再生回数においてもスラッジは発生しなかった。再生 1 回目の時点で 0.76%のスラッジが発生し、再生 4 で最大値の 1.49%となった。そこで、添加剤Bの再生5を添加剤Aで溶解して吸引試験を実施したところスラッジ量は 0.06%と大幅に減少した。本試験では、再生アスファルトの 9 倍の量の添加剤を混合しており、通常は旧アスファルトに対して 10%~20%程度を添加する添加剤を多大に投入しているため、実際の再生時の状況と異なるものの、芳香族分の多い添加剤は劣化した旧アスファルトに対しても高い解膠性がある可能性が示唆された。

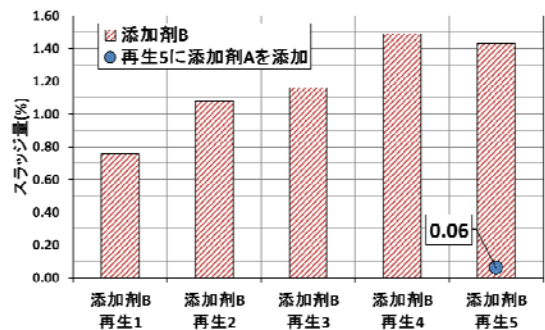


図-10 スラッジ発生量の変化

2.3.2 混合物試験結果

(1) 圧裂試験

圧裂試験の結果として圧裂強度と温度の関係を図-11に示す。なお、図中の凡例において、末尾のAまたはBは再生用添加剤AまたはBをそれぞれ用いたことを示す。圧裂強度を縦軸として対数にした結果、いずれも直線に近くなった。再生用添加剤Aの場合、圧裂強度は0℃から20℃ではORGが高く、再生3・再生5はほぼ同程度に低い値となった。再生用添加剤Bでは、再生回数が増える毎に圧裂強度が小さくなる傾向が認められた。再生アスファルト混合物は再生用添加剤の混入量が高いことからアスファルトによる骨材間の接着性が低くなったものと考えられる。ただし、60℃では各試料の軟化点温度を超えることから差が見られなくなったと考えられる。

次に、変位を図-12に示す。ORGの変位は0℃では再生混合物より小さく、20℃では逆に大きくなった。再生用添加剤Aでは温度依存性はあまり見られず、また、再生回数による違いもほとんどなかった。これに対して再生用添加剤Bでは再生回数が進むと変位が小さくなる傾向が見られた。なお、ORGのみ10℃および40℃において試験数n=1で行った試験結果を追加しているが、20℃ピークに凸型になった。これは既往研究⁷⁾にも見られ今後も議論が必要だと考えられるが、圧裂試験が間接引張に近い試験であること、後述する小型曲げ試験結果より、アスファルトの脆性と試験方法の特性（载荷速度など）によって、圧裂試験では20℃がピークになったのではないかと考えた。

圧裂係数を図-13に示す。0℃のORGの変位が小さいため圧裂係数は大きな値となっている。20℃、60℃で再生3および再生5ではほぼ同じ値となった。60℃の結果を見ると、ORGと再生用添加剤Aは近い値となったが、再生用添加剤Bは高い値を示した。

0℃および60℃の圧裂強度より算出した、圧裂強度比を図-14に示す。ORG、再生3、再生5と繰り返し再生が進むにつれて、低温時のひび割れが発生しやすくなる可能性がある⁷⁾ことが示された。特に、再生用添加剤Bの方が、ひび割れが大きくなる可能性が高いものと考えられた。

(2) ホイールトラッキング試験（動的安定度）

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、DSR試験において高温域で複素弾性率が高くなった結果を反映しているものと考えられる。

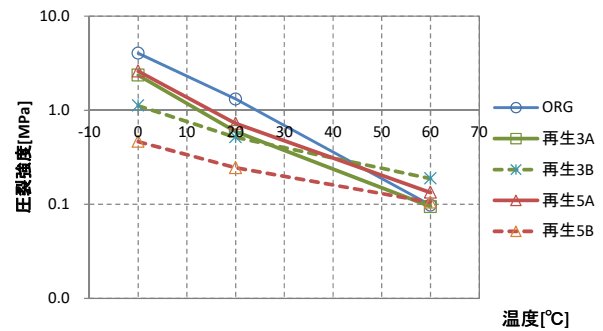


図-11 圧裂強度測定結果

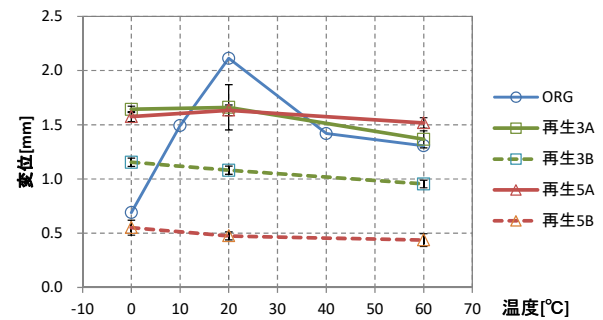


図-12 変位測定結果

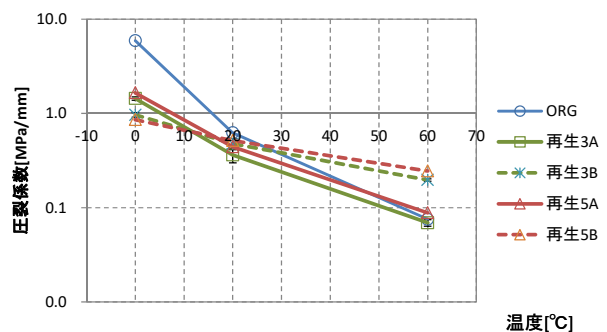


図-13 圧裂係数

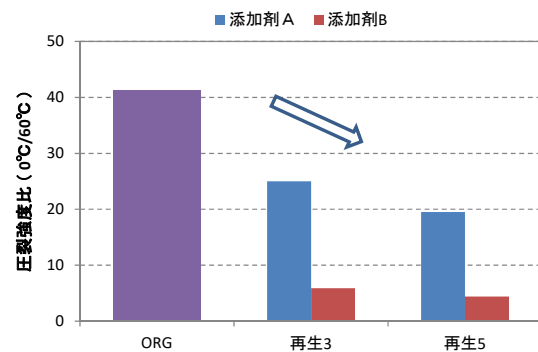


図-14 圧裂強度比

表-7 動的安定度

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

(3) 小型曲げ試験

小型曲げ試験により得られた試験温度と曲げ応力の関係を図-15 に、曲げひずみとの関係を図-16 に示す。曲げ応力のピークおよびひずみの変曲点より、各アスファルトの脆化点はORGが5°C、再生用添加剤Aの再生3が0°Cおよび再生5が-5°Cとなった。しかし、再生用添加剤Bでは、再生3は曲げ応力の変位点は-25°Cであるものの、曲げひずみの明確な変曲点は確認できず、再生5回目にはどちらの変曲点も確認することができなかった。曲げ応力は、ORGの5°Cで一番高い値となり、0°C以上の温度域においてORGが常に高い結果となった。一方、0°C以下の温度域では、ピーク値はORGより低いものの、再生3および再生5の曲げ応力が大きくなった。これは、再生3および再生5は再生用添加剤の割合が高くなったことにより、脆性領域が低温側にシフトしたものと考えられる。

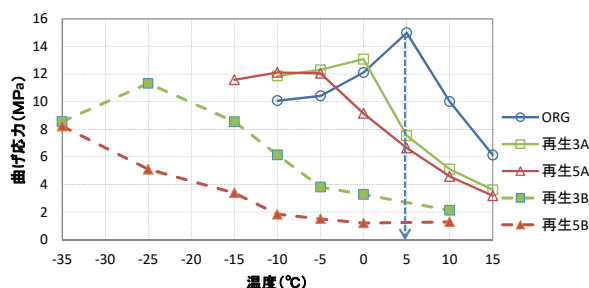


図-15 曲げ応力

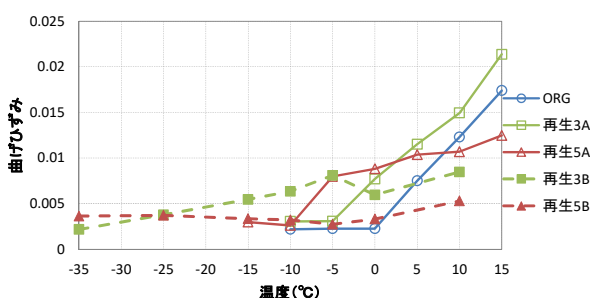


図-16 曲げひずみ

(4) 高温カンタプロ試験

図-17 に供試体温度 60°Cにおけるカンタプロ損失量を示す。ORGは損失が全く無かったのに対し、再生用添加

剤Aでは再生5において約4%の損失量となった。一方、再生用添加剤Bでは再生2以降で損失量が増加し、再生5回目では約98%と損失量が非常に大きなものとなった。したがって、飽和分の多い添加剤で繰り返し劣化・再生を行うと、アスファルトの付着力が低下し、アスファルト混合物が破壊しやすくなったことが示唆された。

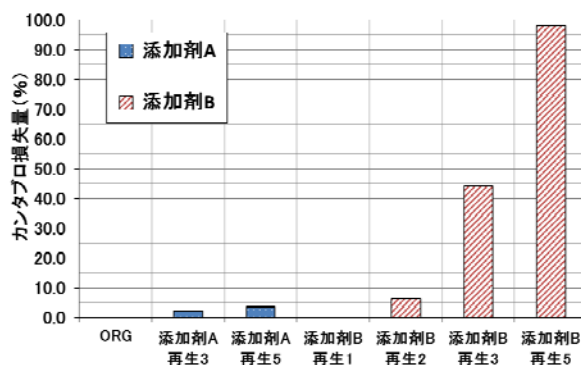


図-17 60°Cにおけるカンタプロ損失率

2.4 まとめ

本研究結果をまとめると次の通りである。なお、本検討は、繰り返し劣化再生による性状変化を際立たせるために、新規アスファルトを追加しない、いわゆる100%再生で実施した結果である。

- 1) 芳香族分の多い再生用添加剤による再生アスファルトは針入度を回復させても軟化点は再生4回以降高い値に移行し、そのまま推移する傾向があった。また、伸度は再生1回から半分以下しか回復せず、特に再生3回以降はほとんど回復しなかった。飽和分の多い添加剤では、軟化点の上昇がより顕著であった。
- 2) 再生アスファルトのカルボニルインデックスは、繰り返し劣化・再生を行う毎に徐々に増加し、その増加傾向は一定の値に収束する傾向が見られた。また、組成分析の結果から、添加剤の組成が再生アスファルトの飽和分や芳香族分の組成割合に影響を及ぼすことが明らかとなった。
- 3) 動的粘弾性状の結果から、繰り返し劣化再生により感温性の低下が示唆された。
- 4) ドライスラッジ発生量の結果から、芳香族分の多い添加剤は劣化した旧アスファルトに対しても高い解膠性がある可能性が示唆された。
- 5) 混合物性状として圧裂試験を行った結果、繰り返し劣化・再生した混合物の圧裂強度はORGに比べ低くなっ

た。再生用添加剤の混入量が高いことからアスファルトによる骨材間の接着性が低くなったものと思われる。また、再生用添加剤の種類によっても差があることが明らかになった。さらに、圧裂強度比より、劣化・再生を繰り返すと低温時のひび割れ率が大きくなる可能性があることが示され、再生用添加剤の種類による差も顕著であった。

- 6) 小型曲げ試験の結果、アスファルトの脆化点は劣化・再生を繰り返すとマイナス側に移行傾向となった。曲げ応力は、ORG のピーク値が最も高く、0°C以上の温度域はすべて高い傾向であった一方、0°C以下の温度域では、再生3および再生5の曲げ応力がORGより若干高くなった。これは再生用添加剤の割合が高くなったことにより、脆性領域が低温側にシフトしたものと考えられる。
- 7) 供試体の温度やロサンゼルス試験機内雰囲気温度を高温にしたカンタブロ試験により、再生アスファルト混合物の損失率を検証することが可能となった。飽和分の多い添加剤で再生した場合、付着力が低下し、破壊しやすくなることが明らかとなった。

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

寒冷地用アスファルトの繰り返し再生利用により、今後、舗装寿命への影響が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について、調査した結果と、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としての適用性を検証するため、試験施工等を実施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、積雪寒冷地における再生骨材の繰り返し利用による性状の変化を把握した結果について報告する。

3.1.1 調査方法

繰り返し利用時における再生骨材の旧アスファルトの性状を確認するため、室内において作製したアスファルト混合物に対し、劣化および再生を繰り返し、性状の変化を評価した。劣化は、再生骨材の品質規格の下限値である針入度20(1/10mm)まで、旧アスファルトを劣化させた試料を繰り返し利用する状況（以下、針入度20劣化）を再現した。また、比較のために針入度30(1/10mm)まで、旧アスファルトを劣化させた試料を繰り返し利用する状況（以下、針入度30劣化）を再現した。なお、使用したアスファルトは積雪寒冷地で用いられているストレートアスファルト80-100である。劣化にはRTFOTおよびPAVを使用し、PAVの試験時間を調整することで目標の針入度の試料を作製した。再生では、「再生添加剤を用いた針入度を調整する手法」を用い、目標針入度は90(1/10mm)とした。

さらに、北海道内の再生アスファルト混合物を出荷している104プラント(2015年現在)のうち17プラントより再生骨材を採取し（以下、プラント採取再生骨材）、室内試験を行った。性状評価にあたっては、再生骨材の品質規格値である針入度および圧裂係数と、軟化点、脆化点について試験を実施した。

3.1.2 試験結果

(1) 針入度と軟化点

図-18に軟化点試験の結果を示す。繰り返し利用する毎に、軟化点が上昇する傾向が見られる。また、針入度20(1/10mm)劣化では上昇傾向が大きく現れているが、針入度30劣化ではその傾向が緩やかとなっている。

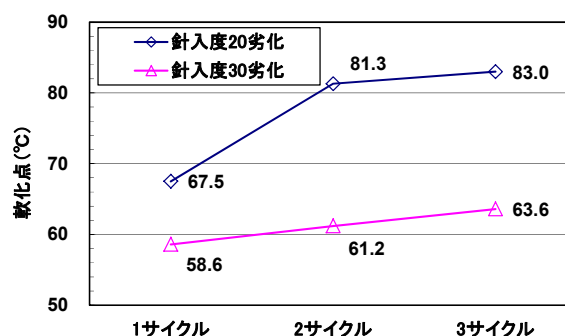


図-18 繰り返し利用における軟化点の推移

図-19にプラント採取再生骨材の針入度と軟化点を示す。針入度が低くなるに従い、軟化点が上昇する傾向が

見られる。また、採取年別に見ると2007年よりも2014年の方が、針入度が低く、軟化点が高い傾向となっている。この結果から、旧アスファルトは年代を追うごとに、言い換えれば繰り返し利用が進むほど、硬くなってきていることが推測される。なお、この傾向は図-19の室内試験における傾向と一致する。

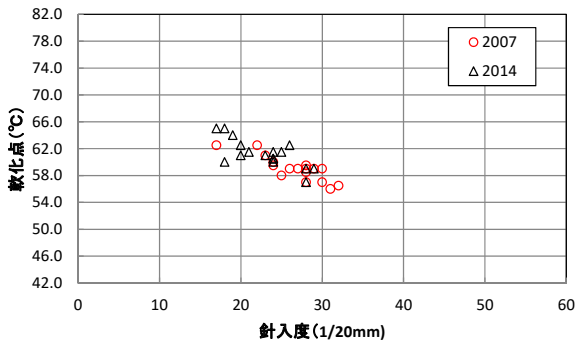


図-19 針入度と軟化点

(2) 針入度と脆化点

図-20に室内劣化試験の結果を示す。針入度20(1/10mm)劣化では顕著な傾向が見られないが、針入度30劣化では、繰り返し利用する毎に、脆化点が増加する傾向が見られる。なお、3サイクルまでにおいては、針入度20劣化のほうが針入度30劣化よりも高い値で脆化点が推移しており、低温において脆い性状となっている。

図-21にプラント採取再生骨材の針入度と脆化点を示す。針入度が低くなるに従い、脆化点が増加している傾向が見られる。また、採取年別に見ると2007年よりも2014年の方が、針入度が低く、脆化点が高い傾向となっている。この結果から、旧アスファルトが年代を追うごとに脆い材料となっていることが推測される。なお、この傾向は図-19の針入度30劣化の傾向と一致している。

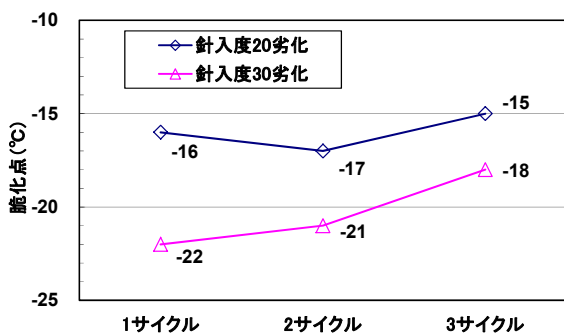


図-20 繰り返し利用における脆化点の推移

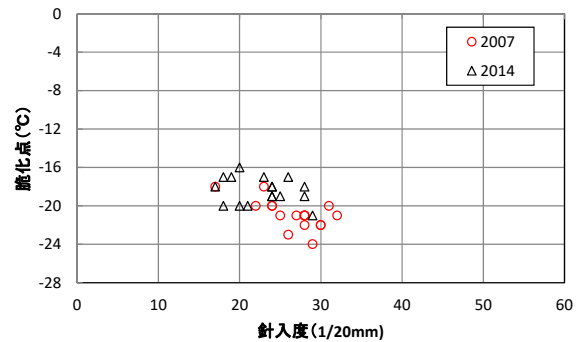


図-21 針入度と脆化点

(3) 針入度と圧裂係数

図-22にプラント採取再生骨材の針入度と圧裂係数を示す。針入度が低くなるに従い、圧裂係数が上昇している傾向が見られる。また、採取年別に見ると2014年の方が、針入度が低く、圧裂係数が高くなっている。この結果から、旧アスファルトが年代を追うごとに脆い材料となっていることが推察される。

また、針入度および圧裂係数の規格値⁹⁾を外れる材料の割合が高まってきていることが確認された。

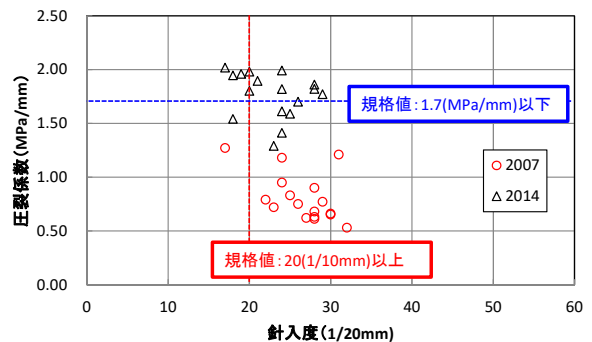


図-22 針入度と圧裂係数

3.1.3 まとめ

以上より、再生骨材の利用を繰り返し行い続けることにより、徐々に旧アスファルトの性状が硬く、脆いものになっており、規格値を外れる材料の割合も高まってきていることが確認された。また、規格値の調整を行うことで繰り返し利用による劣化の影響をある程度抑制できる可能性が確認された。

3.2 再生骨材の凍上抑制層等への利用方法の検討

現在、アスファルト舗装発生材（以下、舗装発生材）は、主に再生加熱アスファルト混合物用骨材として有効

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

そこで、舗装発生材のアスファルト混合物以外への有効利用方法の検討が求められている。これまでに、凍上抑制層材料および歩道用路盤材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-8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-8 再生骨材の性状

試験項目	単位	As再生骨材	規格値
洗い試験	全量に対する0.075mm通過量	%	2.57
	4.75mm以下に対する0.075mm通過量	%	7.13
密度・吸水率試験	表乾密度	g/cm ³	2.369
	絶乾密度	g/cm ³	2.303
	吸水率	%	2.88
修正CBR試験	最適含水比	%	4.8
	最大乾燥密度	g/cm ³	1.917
	修正CBR(20°C)	%	12.3
土の液性限界・塑性限界試験	塑性指数	-	NP
	凍上試験	凍上率(道路土工排水工指針による)	%
			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 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-1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の試験養生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°Cで修正 CBR が10%以下となる結果となった。

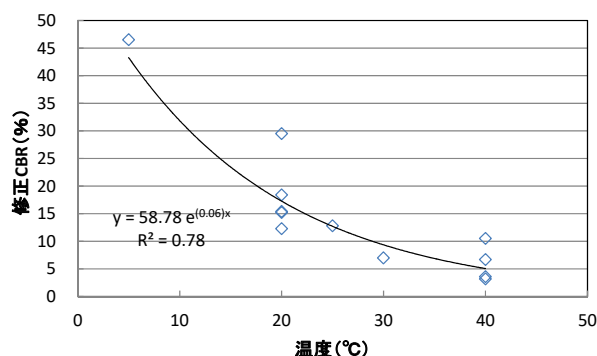


図-23 修正 CBR と温度の関係

(2) DCP 試験

表-1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°Cで推定 CBR が30%以下となる結果となっている。

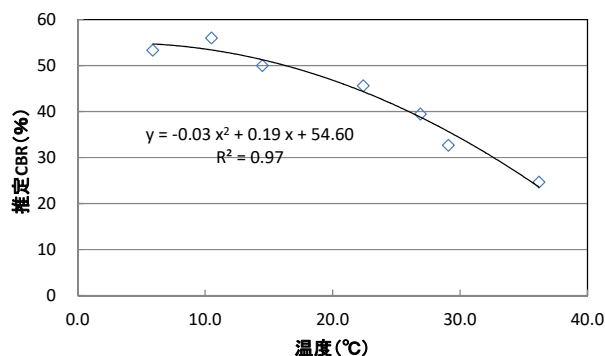


図-24 推定 CBR と温度の関係

(3) FWD 試験

表-1に示した材料と切込砕石80mm級を凍上抑制層材料として用いた試験施工を行い、図-25のように断面を造成し、FWD 試験を実施した。調査時期は、春期、夏期、秋期とした。

荷重補正した D₀ たわみ量の測定結果を図-26に示す。再生骨材は切込砕石と比較して20~40μm程度の差は見られるが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、概ね同等であり、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D₀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。

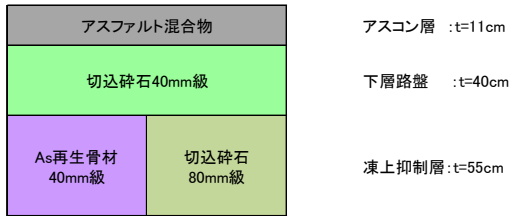


図-25 試験施工箇所の断面

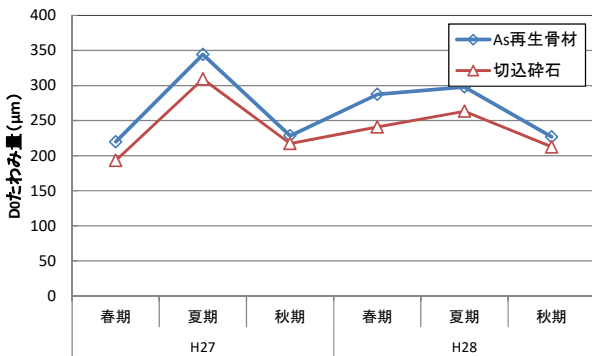


図-26 FWDによるD₀たわみ量

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-27、28に示す。2路線ともに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-6 に示したとおり 30℃未満の条件であれば、10%以上の修正 CBR が得られると考えられる。

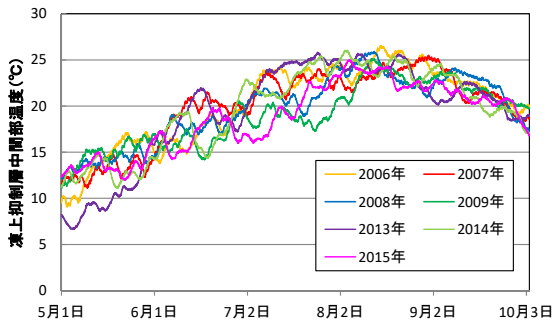


図-27 R238 稚内の凍上抑制層温度

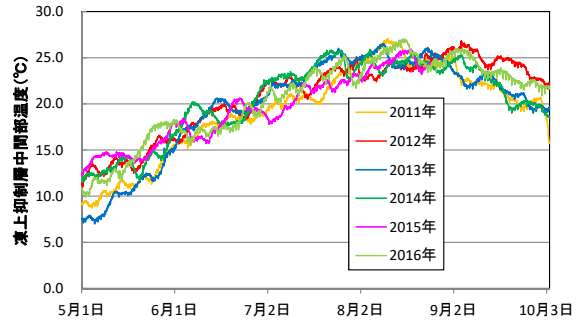


図-28 R231 留萌の凍上抑制層温度

3.2.4 歩道用路盤材としての検討

国道の歩道部において、160mの区間に歩道路盤材料として再生骨材40mm級を使用し試験施工を実施した。また切込砕石40mm級を採用した比較区間も120mあわせて設けた。断面を図-29に示す。

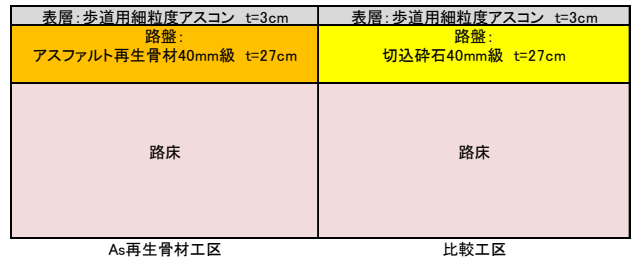


図-29 試験施工箇所の歩道断面

3.2.5 凍上抑制層材料の検討に用いた再生骨材の性状

歩道路盤に使用したアスファルト再生骨材 40mm級、および切込砕石 40mm級の品質を表-9に示す。

アスファルト再生骨材は、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 使用材料の品質

		As再生骨材 40mm級	切込砕石 40mm級	規格値
単位容積質量試験	単位容積質量 kg/m ³	1462	1826	-
密度および 吸水率試験	絶対密度 g/cm ³	2.376	2.590	-
	表乾機密度 g/cm ³	2.447	2.638	-
	見掛密度 g/cm ³	-	-	-
洗い試験	吸水率 %	3.02	1.87	-
	全量に対する 0.075mm通過率 %	2.10	2.72	-
液性限界 液性限界試験	4.75mm以下に対する 0.075mm通過率 %	5.71	10.50	15%以下
	PI	NP	NP	-
安定性試験	安定性試験損失量 %	-	16.0	-
すりへり試験	すりへり減量 %	-	18.2	-
凍上試験	道路土工要領	非凍上性	-	-

3.2.6 歩道用路盤材としての評価結果

(1) 締固め度

再生骨材工区と、比較工区の施工時の機械の構成および転圧回数は同一条件で行われたが、再生骨材工区の締固め度は95.1%と規格値の85%以上を満足し、比較工区の94.2%よりも高い締固め度が得られた。

(2) 路盤の支持力

施工直後にDCP試験によって支持力を評価した結果を図-30に示す。試験実施時は、外気温9.3℃であり、路盤表面で8.9℃、深さh=10cmで8.4℃、h=20cmで10.0℃、路床となる深さh=30cmで12.1℃であった。

アスファルト再生骨材を路盤材に使用した工区の推定CBRの平均値は31.8%を示し、切込碎石を使用した工区の17.4%と比較すると高い値を示した。

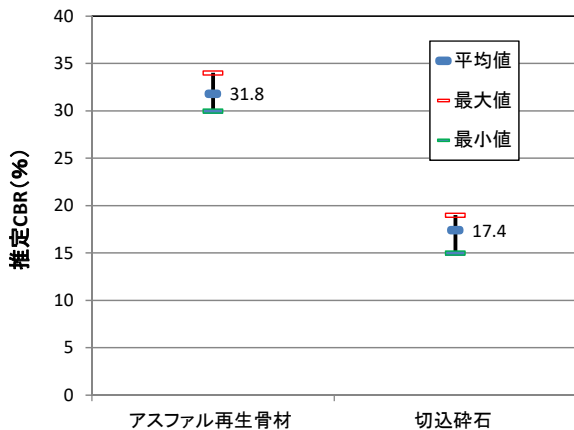


図-30 DCP試験結果

(3) 舗装体の支持力

表層施工後に小型FWD試験により舗装支持力を評価した。試験結果を図-31に示す。再生骨材工区のK値は642NM/m³であり、比較工区と同等程度以上の値が確認された。

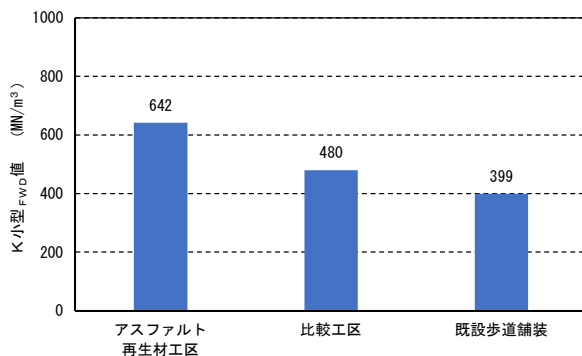


図-31 小型FWD測定結果

3.2.7 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および歩道用路盤材として用いた場合、切込碎石と同等の支持力が期待できる可能性が示唆された。今後は、追跡調査を行い経年的な支持力の推移の把握および適用条件の検討を行っていく。

4. まとめ

平成29年度までに、アスファルト混合物の繰返し再生による影響を把握するため、室内においてアスファルトバインダの劣化・再生を複数回繰返し、アスファルトバインダおよびアスファルト混合物の性状変化の把握を行った。また、積雪寒冷地におけるアスファルト再生骨材の品質変動について調査するとともに、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するため、試験施工を実施した。その結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 再生アスファルトは針入度を回復させても軟化点および伸度は回復しなくなった。
- 2) 再生アスファルトのカルボニルインデックスは、徐々に増加し一定の値に収束した。また、アスファルトの組成分析の結果、レジジン分全体として増加傾向、芳香族分は減少傾向から横ばいに推移した。
- 3) 動的粘弾性状として、複素弾性率は繰返し劣化・再生に伴い温度毎の位相角の差が小さくなる傾向となった。
- 4) 混合物性状として圧裂試験を行った結果、圧裂強度比より、劣化・再生を繰り返すと低温時のひび割れ率が大きくなる可能性があることが示された。
- 5) 小型曲げ試験の結果、再生用添加剤の割合が高くなったことにより、脆性領域が低温側にシフトした。
- 6) 積雪寒冷地において、再生骨材の利用を繰り返して行い続けることにより、徐々に旧アスファルトの性状が硬く、脆いものになっており、規格値を外れる材料の割合も高まってきていることが確認された。
- 7) 再生骨材は、北海道北部地域において凍上抑制層材料および歩道用路盤材として、切込碎石と同等の支持力が期待できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) (社)日本アスファルト合材協会：合材統計年報，2015。
- 2) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007。
- 3) 山口勝之，佐々木巖，明嵐政司：アスファルト材料の紫外線劣化とカーボンブラック添加効果，舗装工学論文集，第8巻，

pp. 251-260, 2003. 12

- 4) ISO 10307-1 : Petroleum products — Total sediment in residual fuel oils — Part 1: Determination by hot filtration, 2009
- 5) 佐野ら：再生混合物の性能向上に関する一検討, 土木学会, 第 72 回年次学術講演会講演概要集, 2017
- 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) 岡部俊幸, 山口将, 富澤健, 金井利浩：間接引張試験における載荷板の形状に関する実験的基礎研究, 第 63 回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-007, p. 13-14, 2008
- 8) 社団法人日本道路協会：舗装再生便覧, p11, 2010. 11

9.1 適材適所のリサイクル材等利活用技術の開発

9.1.3 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

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】

これまでの研究成果、現場技術相談内容、作成したマニュアル類や文献等で把握した現場対応事例を踏まえ、「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」の改訂に盛り込むべき事項に関し、要対策土対応の目標設定から対応方法の選定までの流れについて、平成 28 年度の成果を踏まえて実務的な手順の検討を行った。その結果、発生土の搬出先のリスク評価結果と対策工法の選定を関連づけることで、従来より合理的な対応が可能な方法を提案した。

キーワード：自然由来重金属、建設発生土、搬出先、リスク、不確実性

1. はじめに

土壌汚染対策法の改正（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な対応を実施する事例が急増している。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。

自然由来重金属等を含む建設発生土への対応には次のような課題がある。

建設発生土からの重金属等の溶出性に関しては、長期的な溶出特性を踏まえて評価する必要があるが、それを短時間で評価できる室内試験が確立されていない。

また現場の時間的・空間的な制約条件および地質条件が調査方法に影響を及ぼすため、現場ごとに最適な調査手法が異なる。

さらには発生土の搬出先の立地条件によってリスクの程度が異なり、それに合わせて適切な対応方法が異なる。

土木研究所および寒地土木研究所(旧開発土木研究所)では平成 13 年頃より自然由来重金属等を含む建設発生土への対応に関する研究や技術相談対応を行い、各現場の制約条件に合わせて調査・評価・対策を提案してきた。

そこで本研究では事例が蓄積した現状を鑑み、より効

率的で適正な評価に基づいた発生土の有効利用のために、対応事例に基づく、自然由来重金属等を含む建設発生土への対応の標準化を目指している。

平成 29 年度は、公共事業における自然由来重金属等を含む建設発生土の利用に関するマニュアルである、「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」の改訂にあたって盛り込むべき事項を検討した。

2. 研究方法

土木研究所および寒地土木研究所で平成 13 年頃より実施してきた、公共事業における自然由来の重金属等を含む建設発生土の利用に関する研究の成果、および約 80 件の現場技術相談内容、さらには土木研究所および寒地土木研究所職員が一部を執筆したマニュアル類^{1~4)}や文献等で把握した現場対応事例を踏まえ、平成 28 年度に整理した公共工事における自然由来重金属等を含む建設発生土への対応の考え方を踏まえ、「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」の改訂にあたって盛り込むべき事項を検討した。特に対応の目標設定から対応方法の選定までの流れについて、平成 28 年度は主に概念的な検討を行ったが、平成 29 年度は前年度の成果を踏まえて、実務的な手順の検討を行った。

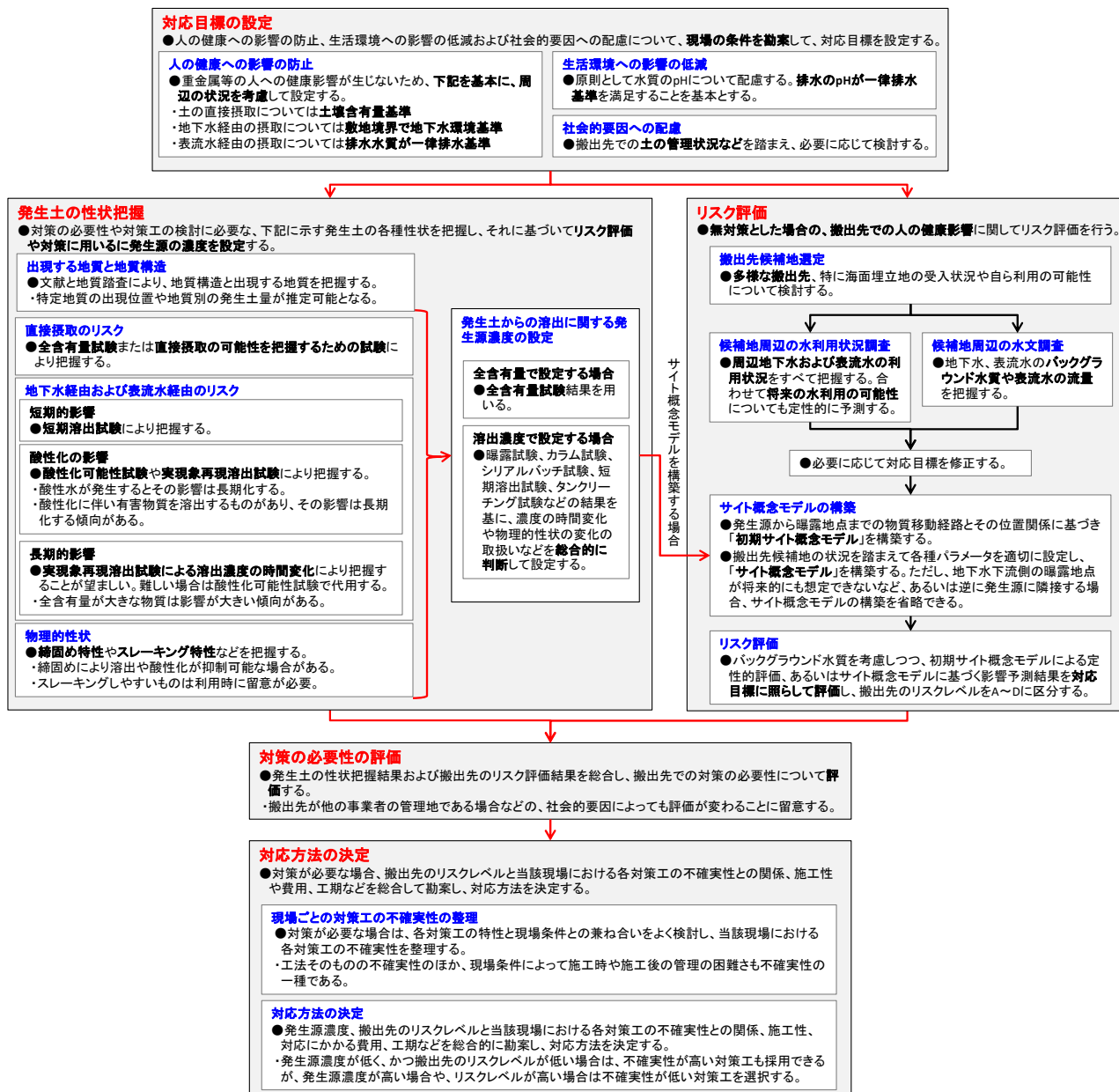


図-1 対応目標の設定から対応方法の決定までの流れとその内容

3. 研究結果

これまでの技術相談対応の経験を踏まえ、発生土の性状と搬出先のリスクを考慮して、対策工法を決定するまでの実務の流れを構築し、それぞれの検討要素に必要とされる内容を検討した。その結果の概要を図-1にまとめた。以下にその内容を検討要素ごとに示す。

3.1 対応の目標設定⁵⁾

3.1.1 人の健康への影響の防止

土壌汚染対策法は「国民の健康を保護することを目的」(第1条)としている。この法律では有害物質の人への曝露経路として、汚染土壌を固体のまま経口摂取する場合と、汚染土壌から水に溶け出した有害物質が地下水

に付加され、これを飲用する場合の2つの曝露経路を評価している。そのほか、発生土の利用の場面では盛土等の構造物からの滲出水が表流水として公共用水域に排水され、水道用貯水池等へ流入し、これを飲用する場合が考えられる。

この点に関する基準として、土の直接摂取については土壌汚染対策法の土壌含有量基準、地下水水質については土壌汚染対策法の地下水基準、また公共用水域への排水に関しては、水質汚濁防止法の一律排水基準を挙げることができる。これらの基準を適用すべき場所として、土の直接摂取については土そのもの、地下水経由の摂取については敷地境界の地下水質、排水については公共用水域への排出地点とすることを原則とすることが考えら

れる。

ただし、たとえば発生土の搬出先が沿岸部の場合、塩水の影響で事実上地下水利用を行うことができないため、必ずしも地下水質が敷地境界で基準を満足しなくとも良いと考えられる。また、公共用水域への排出地点の流量が少ない場合は、希釈の効果があまり認められず、排水の影響で公共用水域の環境基準が満足できなくなる懸念がある。そのような場合にはこれらの基準にかかわらず、別途対応の目標を設定する必要があると考えられる。

3.1.2 生活環境への影響の軽減

公共工事においては農作物を含む生物への影響を可能な限り小さくすることなど、生活環境への影響の低減も重要な視点である。発生土の堆積による生活環境への影響として、重金属等の溶出以外に、土の異常 pH の問題を挙げることができる。土の pH が低すぎる、あるいは高すぎることで、植物の生育への影響が発現し、場合によっては枯死することもある。また土からの滲出水が表流水に流入することで、魚類への影響が出た事例⁶⁾がある。

水域への影響を未然に防止するための pH の目標については、水質汚濁防止法の一貫排水基準を原則とすることが考えられる。

3.1.3 社会的要因への配慮

事業者以外の者が所有・管理する土地に土を搬出する場合、人の健康や生活環境への影響がないと考えられる場合においても、必要に応じて次のような点に配慮する必要がある。

土壌汚染対策法の評価方法は、土壌性状の経時的変化を考慮していないため、ある時点で同法の基準、特に土壌溶出量基準を満足したものが将来にわたってその基準を満足し続けるとは限らない。また土壌汚染対策法は、岩石についてその対象外としているが、スレーキングなどによって岩石が経時的に細粒化することで、その土が将来、土壌として扱われる可能性がある。そのため、事業者以外が所有・管理する土地に土を搬出し、その後土壌汚染対策法の方法を適用して評価した場合、基準を満足しないということが起こりえる。その場合は搬出者が何らかの責任を問われる危険性がある。従って、建設発生土を事業者以外が所有・管理する土地に搬出する場合には、土壌汚染対策法の基準を将来にわたって満足できるよう、曝露試験など、長期的な土の性状の変化を把握し評価するか、搬出土が将来、基準を満足しない可能性があることを土地所有者に理解してもらう必要があると考えられる。

3.2 発生土の性状把握

地質の成因や形成後の時間、風化や変質、その他の環境履歴が類似する一群（ここでは地質区分という）ごとに、ある程度類似の物理・化学的性質を有するものと考えられる。そこで地質学的な調査と分析結果の蓄積によって、対応が必要となる可能性がある発生土がどこからどのくらい発生するかを効率的に把握することができる。

(1) 出現する地質と地質構造の把握

既存の地質図類を参考に地質踏査を行い、地質構造と出現する地質を把握する。調査においては自然由来重金属等含有土や酸性土との関連が深い、風化、変質、鉍微、断層、堆積岩では泥分の多寡などに注目する。地質構造を把握できると、対象とする地質の出現位置が地質学的に推定でき、効率的な試料採取が可能となる⁶⁾。

(2) 地質区分ごとの発生土の性状把握

地質の種類、風化・変質の程度など、および空間的な距離に基づく、比較的同質と考えられる地質区分ごとに複数の代表試料を採取・試験する。そして掘削した発生土が人の健康への影響や生活環境への影響の可能性について、評価するための、地質区分ごとの発生土の性状を把握する。

a) 直接摂取リスク

直接摂取のリスクを把握するための試験結果が土壌含有量基準を満足するものはリスクがないものと判定する。ただし、実際にはまず全含有量試験を行い、分析結果を土壌含有量基準と比較する。そして基準値を満足しない試料についてのみ直接摂取のリスクを把握するための試験を実施して土壌含有量基準と比較する。

全含有量試験を先に実施する理由は以下の2点による。

第一に、直接摂取のリスクを把握する試験は、原理的に全含有量試験結果より必ず小さな値になることから、全含有量試験の結果が土壌含有量基準を下回るは、岩石・土壌の直接摂取リスクへの対応が不要なものとなることができる。第二に、自然由来重金属等含有土は一般に含有量が低く、直接摂取のリスクがあるものがまれであること、さらには全含有量が地質の特徴の把握に有効であるためである。

b) 地下水経路および表流水経路のリスク

岩石・土壌からの重金属等の溶出現象や酸性水の発生現象は、地下水経路および表流水経路のリスクについては、発生土の性状のみならず、搬出先での発生土の利用状況にも依存する。たとえば盛土の内部および還元環境にあ

ると推定される⁸⁾が、室内で実施する溶出試験では還元環境を再現するには高度な実験技術と煩雑な手順を要し、現状は研究的に取り組まれている段階である。

また、掘削により地盤中から掘り起こされた発生土は、時間とともにその性状が変化することがある。岩石・土壌中に含まれる黄鉄鉱の酸化に伴う酸性水の発生現象はその一例であるが、それに伴い重金属等の溶出が見られることがある。酸性水が発生すると、その影響は長期化する。さらに酸性水の発生に伴って重金属等の溶出が起ると、その影響は長期化する傾向がある。盛土内は還元的な環境となっていると考えられる観測事例^{8,9)}があるがその事例は少なく、盛土を築造することによって発生土の酸化をどの程度抑制できるかについて、知見が不足している。

このように現状では、利用環境を想定した溶出濃度推定のための汎用的な試験方法は確立していない。そこで、実際の利用状況を想定し、現場ごとに検討し実施する、実現現象再現溶出試験を参考に、総合的に評価することが望ましい。

実現現象再現溶出試験の実施には時間と費用が掛かること、また、試験方法の決定から結果の評価まで、専門家の関与が望ましいことから、全ての事業において実施することは現実的でない。また、発生土のありとあらゆる利用環境を想定して実現現象再現溶出試験を行うこともまた現実的でない。そこで、現状で比較的实施されている方法(図-2)を示す。

短期溶出試験と酸性化可能性試験の結果を、それぞれ土壤溶出量基準および酸性化可能性の指標($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) \geq 3.5$)と比較し、双方を満足するものを通常の発生土として取り扱える地質区分とする。

いずれかもしくは双方を満足しない地質区分については、その代表試料について、土研式雨水曝露試験などの現場条件に近い試験(実現現象再現溶出試験)の実施を行い、長期的な溶出傾向の変化を踏まえて総合的に評価する。実現現象再現溶出試験の結果もしくは実現現象再現溶出試験ができない場合は短期溶出試験と酸性化可能性試験結果から対応の必要がないもの以外を対応が必要なものとして評価する。ただし同一の地質区分においても試験結果にはばらつきがあることが一般的であることや、現場での施工条件(局所的に高濃度の溶出をする地質があるが現場での分別が困難で、かつ周辺への影響は小さいと考えられる場合や、同一地質について1検体のみわずかに基準を満足しない場合などがあり得る)をふまえ、試験結果については総合的に評価を行う。

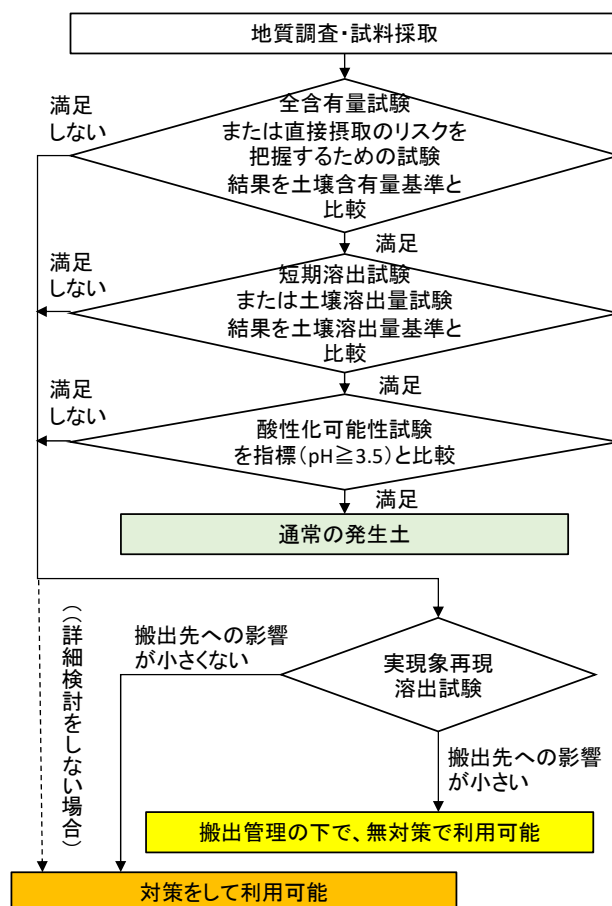


図-2 地下水経路および表流水経路のリスクを考慮した、実務的評価方法

c) 物理的性状

発生土の溶出特性や利用方法の検討の参考となる、締固め特性やスレーキング特性を把握する。

たとえば、締固めがしやすい岩石・土壌の場合は、通常の施工によっても透水係数を低くでき、発生土と水や酸素との接触が抑制できる、すなわち重金属等の溶出や酸性水の発生を抑制できる可能性がある。一方、スレーキングしやすい岩質の場合は、発生土の比表面積が増大することで重金属等の溶出を促進する場合がある。

d) 発生土からの溶出に関する発生源濃度の設定

サイト概念モデルに基づく影響予測(3.3(4))や対策工の設計においては、溶出に関する発生源濃度を設定する必要がある。

発生源濃度の設定方法としては全含有量で設定する場合と浸出水濃度で設定する場合の2通りがある。

全含有量で設定する場合は、全含有量試験による。浸出水濃度で設定する場合は、土研式雨水曝露試験、実大盛土実験、室内カラム試験などのフロースルー試験における浸出水濃度や、pHを調整した溶液を用いるバッチ溶出試験(アベイラビリティ試験)やタンクリーチング試験、もしくはこれらを繰り返し実施することで

時間変化を模擬する試験（シリアルバッチ試験）の濃度を用いる。フロースルー試験やシリアルバッチ試験では、発生源濃度の時間変化をモデルに取り込むことも行われている。

特に浸出水濃度で設定する場合には、上記のように様々な方法が実際に用いられているが、どの方法が妥当であるかについて、よく検討する必要がある。たとえば、バッチ溶出試験では元素によって溶出濃度の固液比依存性が異なる。特にセレンについては固液比依存性が大きい、すなわち固液比が小さくすると溶出濃度がかなり大きくなることが知られている。以上のことから、できる限り実現象に近い方法に基づきつつ、その他の要因（スレーキング特性、酸性化の影響など）を総合して、やや安全側にパラメータを設定することが望ましい。

3.3 リスク評価

ここでいうリスク評価とは、発生源を無対策で搬出した場合に、設定された対応目標を搬出先において満足するかどうかを評価するものである。具体的には搬出先の候補地について、水文調査や水利用状況の調査結果に基づき、初期サイト概念モデル²⁾を構築する。また必要に応じて曝露経路上の地盤に関する各種調査を実施し、それらに基づいて適切なパラメータを設定して、サイト概念モデルを用いた影響予測を実施する。そして初期サイト概念モデルを用いた定性的評価または定量的な影響予測結果に基づき、搬出先のリスクレベルを区分するものである。

なお、掘削量が著しく少ないため仮にリスクを伴っていても影響はごく限定的であると考えられる場合や、同様の地質においてすでに多数の工事实績があり、かつ環境への影響が発生していないことが明らかな場合、あるいは搬出先の状況からリスクが著しく小さいと考えられる場合などにおいては、そのことをもってリスクが小さいものと評価することもある。

(1) 搬出先候補地選定

多様な搬出先候補地を選定することが望ましい。特に海面埋立地は、受入の基準が緩く、大量の発生土を受入可能であることから、候補地として検討する。また、搬出管理が可能であれば、短期的影響が小さくなくとも、長期的影響や酸性化の影響が小さいものについては無対策で利用可能な場合があることから、自ら利用を積極的に検討する。

(2) 候補地周辺の水利用状況調査

候補地周辺の地下水および表流水の利用状況を全て把握する。合わせて将来の水利用の可能性についても定性

的に予測する。調査範囲の設定については文献¹⁰⁾が参考になる。

調査範囲について、100年程度の期間の汚染地下水到達範囲を包括する。その範囲は地下水流速や対象物質、対象物質の地盤への吸着特性に依存するが、文献¹⁰⁾によれば一般的には地下水下流側1km以内とすれば十分であると考えられる。ただし扇状地など、地下水流速が著しく速いと予想される場合においては、個別に検討する必要がある。

また、地下水の下流側の範囲については、地下水主流動方向を地表面勾配から推定し、主流動方向に対し左右90度（地表面の勾配が急であるなど流向が安定していると考えられる場合は左右60度）の範囲とする¹⁰⁾のが一般的である。

さらに地下水の調査範囲の決定においては、山地等の水理基盤が露出する場所や、河川等が不圧地下水の流動境界となることが多い¹⁰⁾ことを考慮することが合理的である。

将来の水利用の可能性については、地下水の状況、地形・地質的な条件や、現在の土地利用や都市計画などから、定性的に推定する。

(3) 候補地周辺の水文調査

候補地周辺の地下水、表流水のバックグラウンド水質を把握する。また、表流水の流量を把握する。バックグラウンド水質が対応目標を上回ることには現実的でないことから、目標設定を変更する。また、表流水の流量は、盛土等からの浸出水の放流先の水質の予測に役立てられる。

(4) サイト概念モデルの構築

発生源から曝露地点までの物質移動経路とその位置関係に基づき初期サイト概念モデルを作成する。初期サイト概念モデルとは、自然由来重金属等を含む土（発生源）、井戸など（曝露地点）と、これらの間の物質移動経路（曝露経路）を挙げ、それらの距離（位置関係）を整理したものである。

初期サイト概念モデルに挙げた、発生源の濃度、発生源から曝露地点までの間の曝露経路の諸性質（距離、動水勾配、地盤の透水係数（飽和および不飽和）、有効間隙率、比貯留係数、降雨量、浸透率、対象物質ごとの地盤の吸着性能（分配係数）など）について、適切なパラメータを設定し、サイト概念モデルの精緻化を行う。パラメータの設定にあたっては、必要に応じて観測や実験を実施する。

ただし、地下水下流側の曝露地点が将来にわたって見

表-1 搬出先のリスクレベルの区分¹⁾

リスクレベル	搬出先の状況の例
A (低い)	<ul style="list-style-type: none"> ・臨海埋立地や対象物質の地下水バックグラウンド濃度が環境基準値を超過しているなど、現状で地下水飲用がなく、将来的にも飲用が見込まれない場所 ・大河川の沿川など、仮に対象物質が地下水に移行したとしてもそのフラックスに対して地下水のフラックスが著しく大きい場所で、対象物質の周辺地下水濃度が環境基準値を満足すると考えられる場合 ・岩盤が浅所に露出するなど、仮に対象物質が地下水に移行したとしてもすぐに河川に復帰し、希釈によって環境基準値を満足すると考えられる場合 ・山地・丘陵など、現状で地下水飲用がなく、将来的に地下水飲用の可能性が非常に低いと考えられる場所
B (普通)	<ul style="list-style-type: none"> ・平野で地下水下流側近傍に人家や飲用井戸が存在しないなど、現状または近い将来、地下水飲用がない場所 ・地下水の下流側に人家や飲用井戸が存在するが、必要に応じて実施する影響予測結果などから、地下水汚染を招いた場合に人家や飲用井戸の近傍に汚染が到達する可能性が少ない場所
C (高い)	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の下流側に人家や飲用井戸が存在するなど、必要に応じて実施する影響評価結果などから、地下水汚染を招いた場合に人家や飲用井戸の近傍に汚染が到達する可能性があると考えられる場所
D (非常に高い)	<ul style="list-style-type: none"> ・敷地に隣接するか、ごく近傍に人家や飲用井戸が存在する場所

込めない場合、あるいは逆に、曝露地点と発生源が隣接する場合は、後述のリスク評価において、それぞれ「リスクが小さい」、「リスクが大きい」と評価できることから、サイト概念モデルの構築を省略できる。

(5) リスク評価

発生源から曝露地点までの有害物質の移動経路をモデル化した初期サイト概念モデルに基づき定性的評価を行うか、あるいは適切なパラメータを設定したサイト概念モデルに基づく定量的な影響予測結果を対応目標に照らし、搬出先のリスクレベルを A (低い)、B (普通)、C (高い)、D (非常に高い) の 4 つに区分する (表-1)。特に、搬出先のリスクレベル B と C の区分にあたっては、影響予測の実施が有効である。

影響予測に用いる数値解析モデルには簡易なものから精緻なものまで各種存在するので、現場ごとに適切なモデルを選択し用いる。その際、発生源濃度については「発生土からの溶出に関する発生源濃度の設定」(3.2 (2)d)の結果を利用する。

リスク評価にあたっては、バックグラウンド水質を考慮する。すなわちバックグラウンド水質が対応目標を上回っている場合においては、対応目標の設定を変更する。

3.4 対応の必要性の評価

発生源の性状および搬出先のリスクレベル区分を勘案し、下記のように対策の要否を判断する。

- ① どのような環境においても重金属等の溶出や酸性化の懸念がないものは、通常の発生土として取り扱うことができる。実務的には全含有量試験または直接摂取のリスクを把握するための試験のいずれか、および短期溶出試験と酸性化可能性試験の結果を用

いて評価することが多い。

- ② ①の結果のいずれか、もしくは全てが基準を満足しないものについては、搬出管理を行う必要がある。

これらのうち、現場条件で環境への影響が小さいと評価されたものは、搬出管理下で自ら利用を行う場合、無対策で利用が可能である。なお、搬出先の土地所有者等が同意した場合においては利用が可能である。実務的には実現象再現溶出試験の結果を踏まえて総合的に判断する。

- ③ ①、②のいずれでもないものについては、搬出管理下で、なおかつ搬出先のリスクレベルが A (小さい) と区分された場所に限って無対策で自ら利用を行うことができる。それ以外のリスクレベルの場所では対策実施すれば自ら利用を行うことができる。

なお、海面埋立地や管理型最終処分場など、搬出先が定める受入れ基準を満足する場合には、そこへ搬出することが可能である。

3.5 対応方法の決定

対策が必要な場合は、当該現場における各対策工の不確実性を整理し、その結果と施工性や費用、工期など総合的に勘案し、個々の現場の状況に合った最善の対応方法を決定する。

1) 現場ごとの対策工の不確実性の整理

対策が必要な場合は、各対策工の特性と現場条件との兼ね合いをよく検討し、当該現場における各対策工の不確実性を整理する。

工法そのものの不確実性のほか、現場条件によって施工時や施工後の管理の困難さも不確実性的一种である。たとえば、遮水シート工は、これまで多くの実績がある

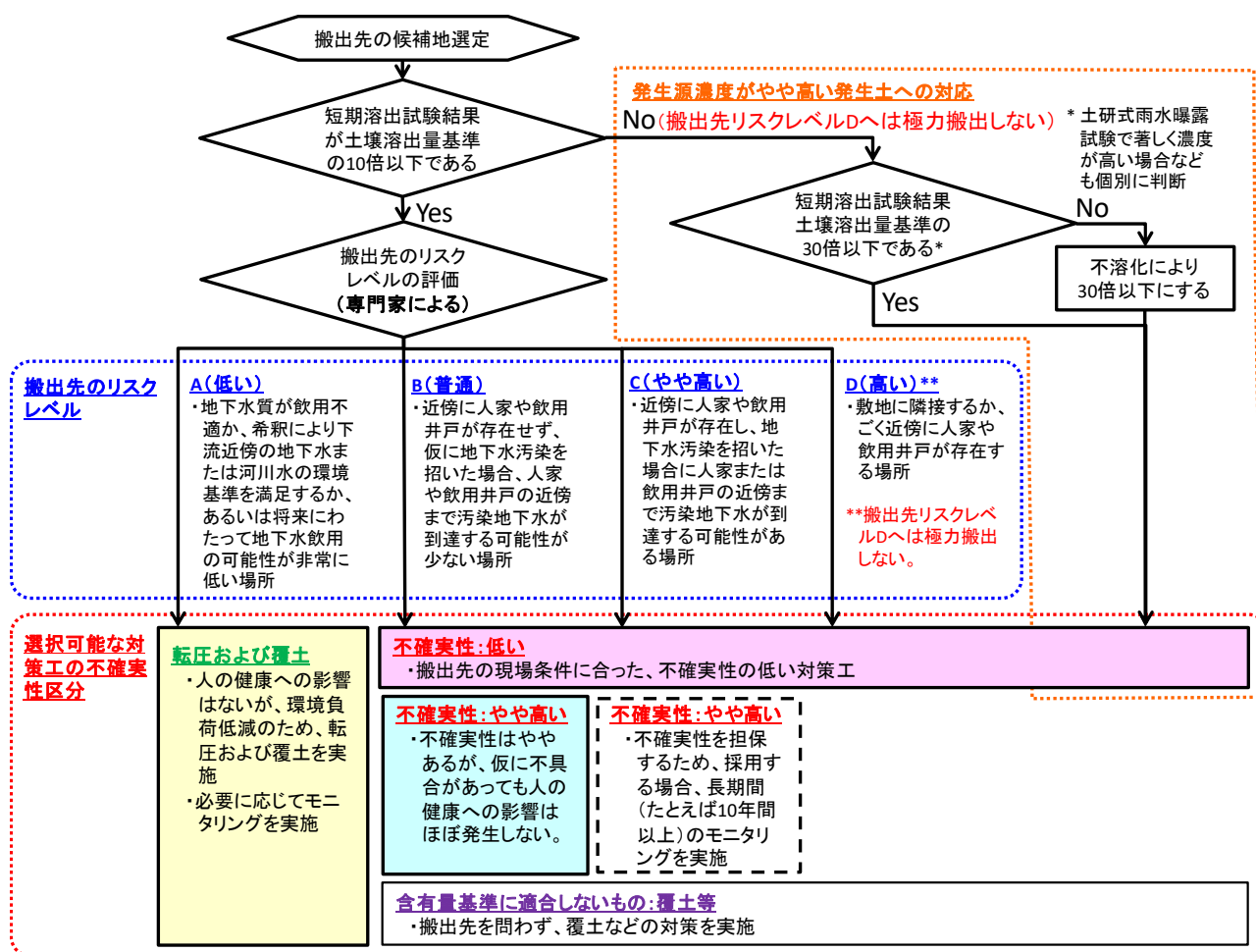


図-3 対策工の不確実性と搬出先のリスクレベルを考慮した対策工の選定¹¹⁾を修正

方法であるが、シート表面でのすべりの発生が懸念される。また引張応力が働く可能性があるような、地盤条件が悪い場所での施工には、不確実性が高い工法と言える。またたとえば、吸着層工法については、土の浸透現象がその土質条件などの影響で不均質な流れになる可能性があるなど、現状では設計手法が確立していないことから、長期的な溶出が懸念されるような現場においては工法としての不確実性が高いと考えられる。

2) 対応方法の決定

発生源濃度、搬出先のリスクレベルと当該現場における各対策工の不確実性との関係、施工性、対応にかかる費用、工期などを総合的に勘案し、対応方法を決定する。

発生源濃度が低く、かつ搬出先のリスクレベルが低い場合は、不確実性が高い対策工も採用できるが、発生源濃度が高い場合や、リスクレベルが高い場合は不確実性が低い対策工を選択する(図-3)。

4. まとめ

「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」の改訂に盛り込むべき事項に関し、

対応の目標設定から対応方法の選定までの流れについて、検討を行った。その結果、発生土の搬出先のリスク評価結果と対策工法の選定の関連づけることで、従来より合理的な対応が可能な方法を提案した。

参考文献

- 1) (独)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)：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)，土木研究所共同研究報告書，No.358，91p.，2007。
- 2) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会：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(暫定版)，89p.，2010，国土交通省のリサイクルホームページ，<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/recyclehou/manual/index.htm>。
- 3) (独)土木研究所・(一財)土木研究センター地盤汚染対応技術検討委員会編著：建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック，大成出版社，101p.，2015。
- 4) 北海道開発局：北海道開発局 道路設計要領第4集トンネ

- ル, pp.4-参-2-1~19, 2017, 北海道開発局ホームページ,
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g700000021j2-att/splaat000000i4yl.pdf.
- 5) 品川俊介・阿南修司：公共工事における自然由来重金属等を含む建設発生土への対応, 地盤工学会誌, Vol.65, No.12, pp.4-7, 2017.
- 6) 品川俊介・阿南修司：自然由来重金属等を含む建設発生土の合理的な調査・評価—あるトンネル工事の事例—, 地盤工学研究発表会講演集, pp.2189-2190, 2018.
- 7) 国土交通省多治見砂防国道事務所：新滝ヶ洞溜池の水質異常に係る情報, 国土交通省多治見砂防国道事務所ホームページ, 2003-2017, 入手先 <http://www.cbr.mlit.go.jp/tajimi/suishitsu/index.html>
- 8) 田本修一・伊東佳彦・日下部祐基・五十嵐敏文・渡邊歩・青木卓也：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験, 第47回地盤工学会北海道支部技術報告集, pp.247-250, 2007.
- 9) 品川俊介・安本和己・浅井健一・中川清森・佐々木靖人：盛土の築造方法の違いによる自然由来重金属等溶出特性の比較, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2077-2078, 2011.
- 10) 環境省 水・大気環境局 土壤環境課(2012)：特定有害物質を含む地下水が到達し得る「一定の範囲」の考え方。「土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン(改訂第2版)」Appendix_1-17, 2012.
- 11) 品川俊介・阿南修司：自然由来重金属等を含む建設発生土, 地盤工学会誌, Vol.65, No.8, pp.57-64, 2017.

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。

平成29年度は、組成の異なる再生用添加剤による再生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量を検証した。また、アスファルトフェームの分析を、より安全に実施するための抽出溶媒の検討を行った。その結果、再生用添加剤の種類によらず、再生アスファルト混合物でも中温化の効果が出ることが明らかとなった。また、代替溶剤を用いることで、より安全に分析できる可能性を見出した。

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。

平成29年度は、組成の異なる再生用添加剤による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検証した。また、アスファルトフェームの分析に用いる溶剤について、より安全性の高い代替溶剤の検討を行った。

2. 中温化再生アスファルト混合物の製造実態

2.1 はじめに

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、平成28年度は、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うこととした。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

1,000t 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 はじめに

2011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。今年度は室内でのアスファルトフェームの測定手法を検討し、混合温度低減による粒子状物質の削減効果について検証した。

3.2 既往研究

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

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-1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。

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

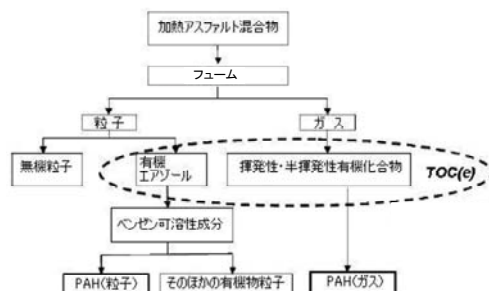


図-1 アスファルト混合物から発生する物質

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



写真-1 アスファルトフェーム測定系の様子

続の様子を写真-1に示す。2枚羽の攪拌羽にてアスファルト混合物を加熱混合した。また、混合槽に蓋をしてアスファルトフェームの拡散を防ぐようにし、蓋にはPTFEフィルタ(2μm孔)、吸着管を接続した。吸着管

の先に接続したポンプにより、アスファルト混合物の加熱中に発生するガスを吸引し、フィルタに捕捉される粒子状物質や吸着管に捕捉される物質を解析する。なお、流量は2 L/min とした。今年度は、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。

3.3.3 測定手順

- 1) ガラス器具類および 2 μ 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 μ 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 $^{\circ}$ C、7~27kPa 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-2 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 $^{\circ}$ 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 5mg/m³」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 $^{\circ}$ C		見た目の変化なし
160 $^{\circ}$ C		端部が黄色くなり、中央が黒ずむ
190 $^{\circ}$ 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

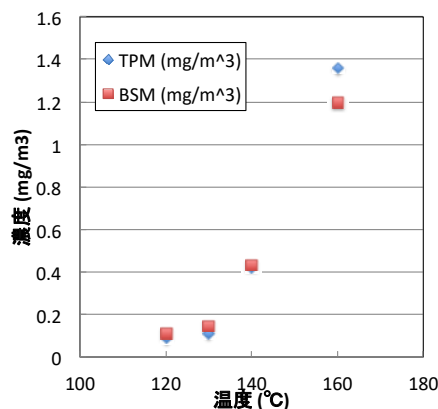


図-2 TPM および BSM 濃度

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 はじめに

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、攪拌子やモーターの能力が小さく、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ーム量を調べ、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. アスファルトフュー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。それぞれの添加剤の性状を表-4に示す。

表-4 使用材料の性状

	ストレートアスファルト 60/80		添加剤A	添加剤B	
密度 (g/cm ³)	1.037	密度 (g/cm ³)	0.975	0.909	
針入度 (1/10mm)	70	組成 (%)	アスファルテン分	0.1	
軟化点 (°C)	46.5		レジン分	6.1	
伸度 (cm)	100+		芳香族分	88.1	47.7
			飽和分	5.7	49.9

4.2.2 アスファルトフューム採取方法

アスファルトフュームの発生量を測定するために、写真-2に示すバ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ュームを採取した。なお、ASTM D6494-99 および NIOSH 5042 を参考に表-5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、フュームの採取時間は、混合後の攪拌開始 15 分から 45 分までの 30 分間とした。

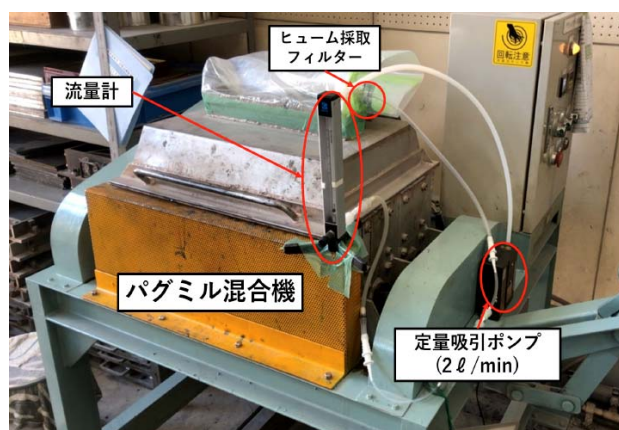


写真-2 アスファルトフュームの採取状況

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-5 アスファルトフューム採取の試験条件

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	

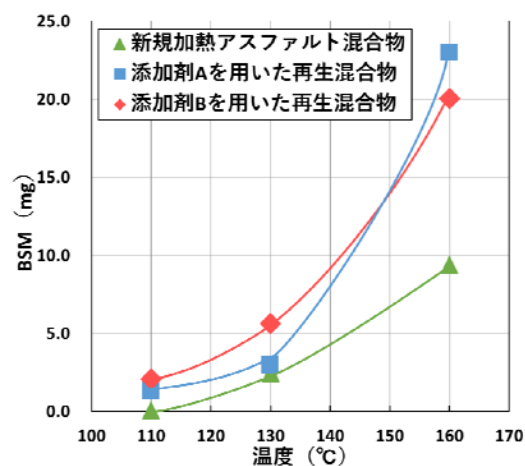


図-3 各混合物から採取した BSM 量

5. アスファルトフューム抽出のための溶媒検討

5.1 はじめに

現在、アスファルトフュームの発生量は、気中に発散したアスファルトフュ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、アスファルトフュ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ュームを、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。アスファルトフュ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、アスファルトフュームの抽出溶媒の代替品として候補に挙げた⁷⁾。

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ュームを抽出し、どの程度の可溶分が得られるか調べた。抽出手順を図4に示す。アスファルトフュ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℃で2時間揮発させた後、さらに80℃で30分間加熱した。

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質量を図5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。ベンゼン可溶分と比較してトルエンやMEKの可溶分に、大きな差は認められなかったが、トルエンの方がベンゼンに近いと判断した。したがって、ベンゼン以外の有機溶媒でもアスファルト

フュームを抽出することは十分可能であることが明らかとなった。今後は安全性を考慮して代替溶媒にてアスファルトフュームの分析を行う予定である。

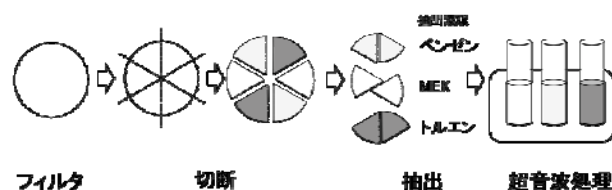


図4 抽出手順

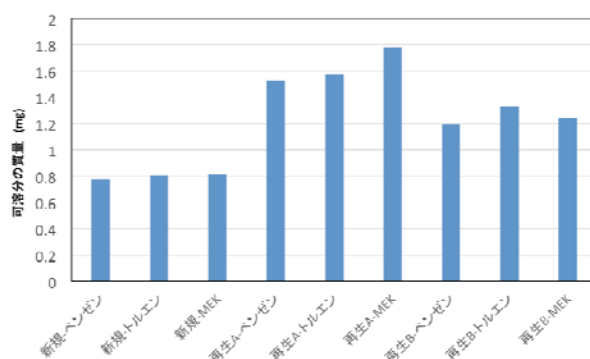


図5 可溶分の質量

6. まとめ

平成29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。

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) ASTM Designation:D6494-99 : Standard Test Method for Determination of Asphalt Fume Particulate Matter in Workplace Atmospheres as Benzene Soluble Fraction,2010
- 6) NIO SH 5042 ; BENZENE-SOLUBLE FRACTION AND TOTAL PARTICULATE(ASPHALT FUME),1998
- 7) 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

9.2 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

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、水素水を試験溶媒として用いた連続溶出試験を実施したほか、埋土（還元）を想定したバッチ吸着試験を実施した。その結果、ヒ素・ホウ素の溶出傾向は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、初期積算溶出量が増加することを確認した。また、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着性能は酸化還元電位が概ね 400 mV から 250 mV まで低下すると、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明らかにした。

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

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の環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の環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。平成 30 年度は、まずヒ素・ホウ素を含む泥岩

ずりを対象に、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実施し、酸化還元電位を低下させヒ素・ホウ素の溶出傾向を分析した。次に、還元環境における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。

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、過年度に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。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

連続溶出試験方法のフロー図を図-1 に示す。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 5 回繰り返し実施した。窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で、水素水の溶媒に液固比 10 の割合で泥岩ずりを PVC ボトルに投入した。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。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。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、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4回繰り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を除く試験回数までの各溶出量の累積値を積算溶出量とし、過年度に実施した蒸留水および脱気水の試験結果とあわせて酸化還元電位の違いによるヒ素・ホウ素の溶出傾向を考察した。

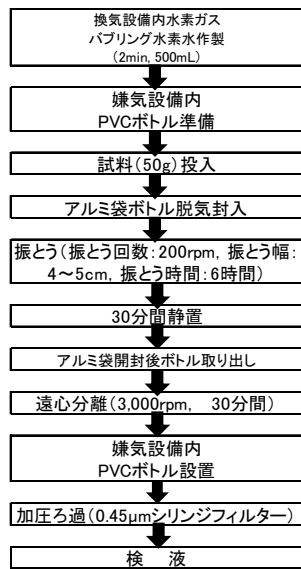


図-1 連続溶出試験方法のフロー図

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)

2.2 盛土と埋土を想定したバッチ吸着試験

2.2.1 試料

溶媒作製に用いた泥岩ずりは、2.1.1で述べたものと同じものを用いた。また、吸着試験に用いた天然材料は、重金属等の吸着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²⁾を用いた。試料は、北海道土壌図³⁾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ふるいを通してものを試験に供した。

2.2.2 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作製した。さらに、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、吸着試験用溶液とした。

吸着試験は、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に示す液固比の割合で各天然材料を投入した。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、振とう回数200rpm、振とう幅4~5cmで24時間振とう後、3,000rpm、20分間遠心分離した。その後、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、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⁴⁾。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 吸着試験の液固比

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

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-2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が低下したことにより方解石の溶解が促進されたことによると考える。

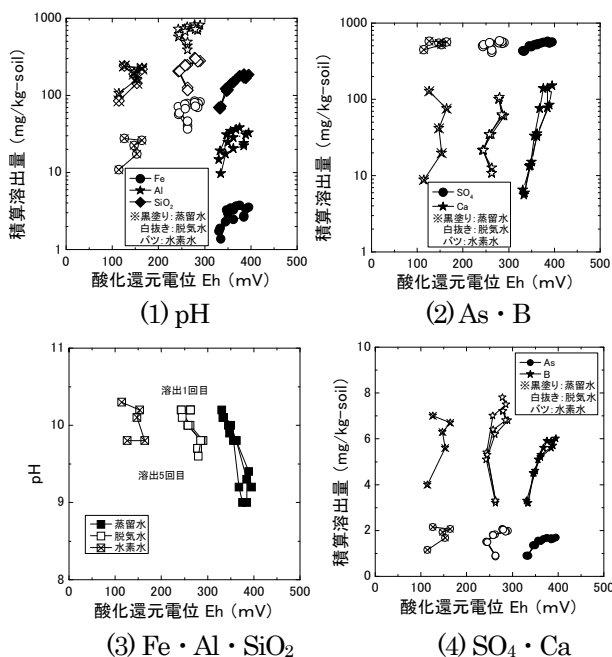


図2 酸化還元電位とpHおよび各分析項目の積算溶出量との関係

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。

3.2 バッチ吸着試験結果

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 mV～450 mVを示し、脱気水溶液のEhは265 mV～389 mV、水素水溶液のEhは219 mV～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117 mV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。

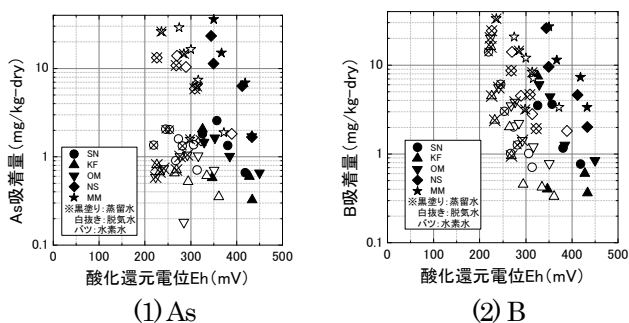


図-3 吸着試験後Ehと吸着量との関係

また、水素水溶液の平衡液相濃度と吸着量との関係を図-4に示す。直線は吸着等温線を示す。Asの吸着量が0.60 mg/kg-dry～26.1 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.001 mg/L～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 mg/kg-dry～33.2 mg/kg-dryを示し、平衡液相濃度は0.50 mg/L～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。そこから、

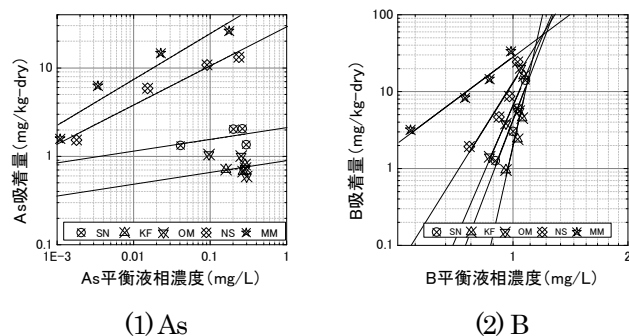


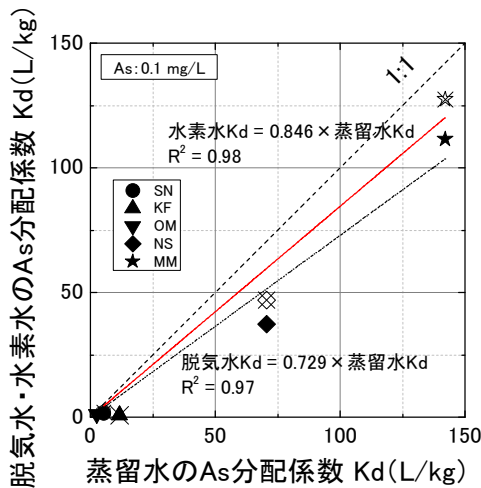
図-4 平衡液相濃度と吸着量との関係

図-4に示される吸着等温線で全試料が内挿される平衡液相濃度 (As : 0.1 mg/L, B : 1.0 mg/L) と表-3の(2)式より求めた定数の一覧より Kd を算出した。

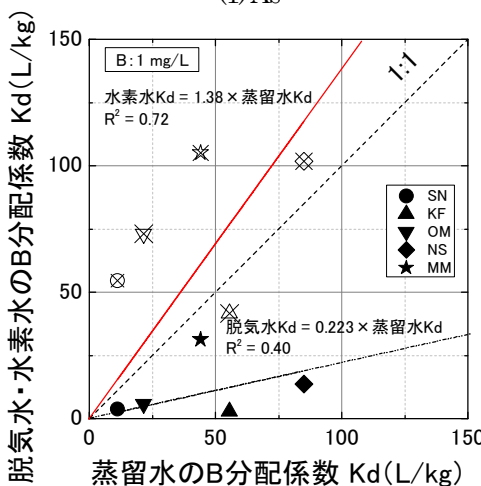
そのほか、蒸留水溶液の分配係数と脱気水・水素水溶液の分配係数との関係を図-5に示す。蒸留水溶液の Kd と比較して、脱気水溶液の Kd は As で約 70%程度、水素水溶液で約 85%程度であった。一方、B では脱気水溶液で約 20%程度であったものが、水素水溶液では約

表-2 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



(1) As



(2) B

図-5 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

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。

4. まとめ

本報告では、ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりを対象に、水素水を試験溶媒として用いた連続溶出試験および埋土(還元)を想定した天然材料のバッチ吸着試験を実施した。その結果、以下のようにまとめられる。

- 1) 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) 天然材料のバッチ吸着試験を実施した結果、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。

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。また、本試験方法を「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(暫定版)」の改訂に反映させるなどして試験方法の普及に努めていく必要がある。

参考文献

- 1) 渡辺博志：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、平成 28 年度研究開発プログラム報告書、国立研究開発法人土木研究所、pp.34~38、<http://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2016/pdf/pro-9.pdf>、2018。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。