

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開始した。また、凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性について検討した。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、数種の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、再生路盤材を生産している中間処理場数社から路盤用の再生骨材を入手し各種骨材試験を行い、その品質を確認した。

アスファルト混合物に関しては、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に対し劣

化・再生を複数回繰り返し、アスファルト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。

建設発生土については、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、自然由来重金属等を含む建設発生土に関する合理的な対応の基本的考え方を整理した。また、基本的考え方に基づき、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、現状調査として、全国のアスファルト合材プラントでの中温化技術を適用した再生アスファルト混合物の製造実態についてアンケート調査を実施した。また、温度低減によるアスファルトフュームの削減効果を検証するために、室内試験にて混合時のアスファルトフュームを採取し、全粒子状物質やベンゼン可溶分の発生量を測定した。

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、蒸留水と脱気水を試験溶媒として用いた連続溶出試験を実施し、酸化と還元によるヒ素・ホウ素の溶出傾向を把握した。また、盛土（酸化）と埋土（還元）を想定したバッチ吸着試験を実施し、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。

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 surplus 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 2016, 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 surplus soil containing heavy metal derived from natural.

Key words :recycled concrete aggregate, recycled asphalt aggregate, surplus 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開発

9.1.1 コンクリート用骨材への利用に関する研究

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、島多昭典、安中新太郎、片平博、吉田行、清野昌貴

【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開始した。また、凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性について検討した。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、数種の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、再生路盤材を生産している中間処理場数社から路盤用の再生骨材を入手し各種骨材試験を行い、その品質を確認した。

キーワード：再生骨材、耐凍害性、アルカリ骨材反応抑制対策、乾燥収縮

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、再資源化されるコンクリート塊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対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、普通骨材に比較して品質の変動が大きい等、課題も多い。これらの課題を解決し、再生骨材コンクリートの普及に寄与するのが本研究課題の趣旨である。

28年度は、再生骨材コンクリートの 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開始した。また、ASR 抑制対策の方法として混合セメントを利用する機会が多いが、凍結防止剤散布地域におけるスケーリン

グ抵抗性に関する検討が不足していることから、凍結防止剤散布地域における混合セメントを用いた再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗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、3種類の再生粗骨材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、路盤用再生骨材の生産者数社から路盤用再生骨材を入手し、生産方法や原骨材の入手元をヒアリングして整理するとともに、再生骨材の品質について検討を行った。

2. 再生骨材コンクリートのアルカリ骨材反応抑制対策の検討

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。

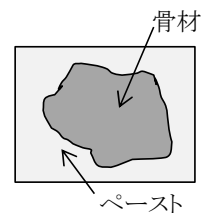
- (1)コンクリート中の全アルカリ量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下にする
- (2)抑制効果のある混合セメント（高炉セメント B 種、フライアッシュセメント B 種等）を用いる
- (3)安全と認められる骨材を用いる

コンクリート中のアルカリ量の大半はセメント中に存在する。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

表-2.1 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-2.1 普通コンクリートと再生骨材コンクリート

スラグやフライアッシュが硬化時の反応でセメント中のアルカリを消費するため、骨材と反応するアルカリ量が低減され、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、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。このため原骨材を特定することは困難で、(3)の対策をとることは事実上難しい。また、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、再生骨材コンクリートは、旧ペースト中に存在するアルカリ量の分だけ普通コンクリートよりもアルカリ量が多くなる。このため(1)の抑制対策をとることも一般には困難である(再生骨材を普通骨材に少量混合する場合はその限りではない)。このため、再生骨材コンクリートの抑制対策には(2)の方法を採用するケースが多い。

現在の再生骨材のJISに示されているASR抑制対策を整理して表-2.1に示す。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、構造物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。これらに対して再生骨材Mを用いたコンクリートでは、非常に複雑な抑制対策が示されている。一般に流通している高炉セメントの高炉スラグ含有率は40~45%であり、高炉セメントの使用でASRを抑制できる配合の範囲は限定的である。

再生骨材Mを用いたコンクリートのASR抑制対策が、

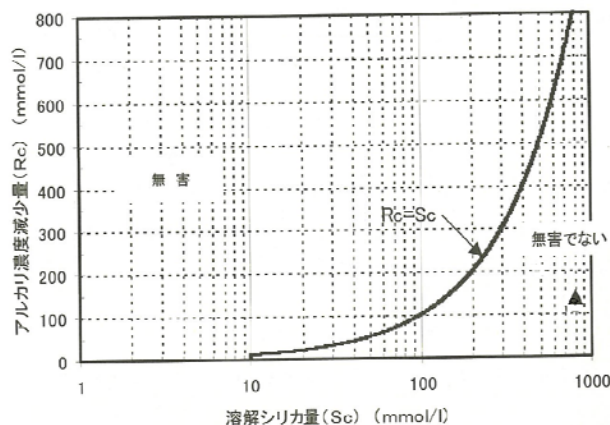


図-2.2 原骨材のASR反応試験(化学法)判定図 (文献1)のデータを一部修正

このように複雑になっている理由は、旧ペースト中のアルカリ量の影響を考慮していることによる。この分野の研究として、平成15~16年に行われた電力施設解体コンクリート利用検討小委員会(土木学会)の実験結果¹⁾があり、ここでは、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ため、さらなる実験データの収集を試みた。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うものである。

2.2 実験方法

実験には12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ASR反応試験(化学法)の結果を図-2.2に示す。

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 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

また、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る。

この原コンクリートを破碎し、再生骨材を製造した。また、可能な限り旧ペーストをそぎ落とし、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、コーンクラッシャーで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、本来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、全てのペーストをそぎ落としたわけではなく、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、2.2に示す。

この再生骨材、反応性原骨材に、さらに反応性を有しない石灰石骨材(表-2.3参照)を用い、再生骨材コンクリートを製造した。使用したセメントおよび骨材の組み合わせを表-2.4に示す。すなわち、再生骨材や原骨材を用いて同一の配合でコンクリートを製造し、その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ようとするものである。コンクリートの配合としては、粗骨材最大寸法Gmax20mm、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。

ASRの膨張率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に調整することが提案されている。本試験の配合で最もアルカリ量が少ない配合は表-2.4中の1の配合であり、セメント中の推定アルカリ量は約2kg/m³であった。このため、添加するNaOH量は3.5kg/m³とした。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NaOH量は3.5kg/m³とした(配合7を除く)。

表-2.4の組み合わせでコンクリートを練り混ぜ、100

表-2.3 骨材の品質

		絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
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



写真-2.1 再生骨材と原骨材

表-2.4 ASR促進試験の配合組み合わせ

シリーズ1				シリーズ2			
No.	セメント	細骨材	粗骨材	No.	セメント	細骨材	粗骨材
1	NC	○	○				
2	NC	○	●	9	NC	○	▲
3	NC	●	○	10	NC	▲	○
4	NC	●	●	11	NC	▲	▲
5	BB(40%)	○	●	12	BB(40%)	○	▲
6	BB(40%)	●	●	13	BB(40%)	▲	▲
7*	BB(40%)	●	●				
8	BC(50%)	●	●	14	BC(50%)	▲	▲

○:石灰石骨材、●:反応性原骨材、▲:反応性再生骨材

* NaOH添加量8.5kg/m³、他のケースは一律3.5kg/m³

×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値を測定し、保水紙とポリエチレン製袋で包んで、40℃

の恒温槽に保管した。

28年度は、コンクリート供試体の製造までを行った。
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する計画である。

3. 凍結防止剤散布地域における凍害対策の検討

3.1 研究概要

近年、凍結防止剤の散布地域等では、凍結防止剤に含まれる塩化物の影響により、凍害（スケーリング）劣化が急速に進行する現象が問題となっている。再生骨材コンクリートのスケーリング抵抗性については十分な知見が得られているとは言いがたく、また、2. で述べたように再生骨材コンクリートでは ASR 抑制対策として高炉セメントを使用する機会が多いが、高炉セメントを使用するとスケーリング量が多くなるという研究報告²⁾もある。このため、凍結防止剤散布地域における再生骨材コンクリートのスケーリング抵抗性について検討を行うものである。28年度は、再生骨材コンクリートの有力な利用用途の一つであるプレキャスト製品の配合を対象に検討を行った。

3.2 実験方法

実験には表-3.1 に示す2種類の再生粗骨材を使用した。配合は表-3.2 に示す7配合とした。配合1は普通骨材を用いた比較用の配合であり、これに対して配合2~4には再生粗骨材 M1 を、配合5~7には再生粗骨材 M2 を使用した。配合2と5は ASR 抑制対策として、アルカリ総量を 3kg/m^3 以下に抑える観点から再生粗骨材の混入率を20%とした配合、配合3と6は再生粗骨材を100%使用し、ASR 抑制対策として高炉セメント B 種を使用した配合、配合4と7は再生粗骨材を100%使用し、ASR 抑制対策としてフライアッシュを添加した配合とした。

供試体は、圧縮強度試験用および塩分浸透抵抗性試験用の円柱供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) と凍結融解試験用の角柱供試体 ($100 \times 100 \times 400\text{mm}$) を作製し、蒸気養生（前置き時間 2hr、昇温速度 20°C/hr 、最高温度 60°C で 2hr）を実施し、翌日に脱枠、1日水中養生を行った後に気中養生を材齢14日まで行った。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従い材齢1日と14日で3本ずつ行った。

塩分浸透抵抗性の試験としては非常・電気泳動試験を実施した。この試験は高さ 50mm に切断した円柱供試体の両側面に NaOH 溶液と NaCl 溶液を配置し、電圧をかけることで塩化物イオンを強制的に供試体内に浸透させるもので、3水準の通電時間と塩化物イオン浸透深

表-3.1 再生粗骨材とその他のコンクリート材料の品質

材料の種類	骨材寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	FM凍害指数	
再生粗骨材	M1	5-15	2.44	4.06	0.07
	M2	5-20	2.27	5.60	0.12
その他の材料					
水(W): 上水道水					
普通セメント(NC): 密度 3.15g/cm^3 , 比表面積 $3,310\text{cm}^2/\text{g}$					
高炉セメント(BB): 密度 3.04g/cm^3 , 比表面積 $3,850\text{cm}^2/\text{g}$					
フライアッシュ(FA): II種, 密度 2.34g/cm^3 , 比表面積 $5,710\text{cm}^2/\text{g}$					
細骨材(S): 砕砂, 絶乾密度 2.57g/cm^3 , 吸水率 1.92%					
普通粗骨材(G(普通)): 碎石, 絶乾密度 2.67g/cm^3 , 吸水率 0.98%					
化学混和剤: 高性能減水剤 (I種), AE剤 (I種)					

表-3.2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
			W	C	FA	S	G (普通)	G (M1)	G (M2)
1 NC-0	41.8	37.1	142	340	-	681	1188	-	-
2 NC-20M1	41.8	37.1	142	340	-	681	950	223	-
3 BB-100M1	39.0	40.1	144	(369)	-	721	-	1037	-
4 FA-100M1	41.8	38.6	152	364	73	658	-	1012	-
5 NC-20M2	41.8	37.1	142	340	-	681	950	-	221
6 BB-100M2	39.0	37.2	142	(364)	-	671	-	-	1087
7 FA-100M2	41.8	36.3	145	347	69	634	-	-	1064

Cの欄: ()は高炉セメント, その他は普通セメント

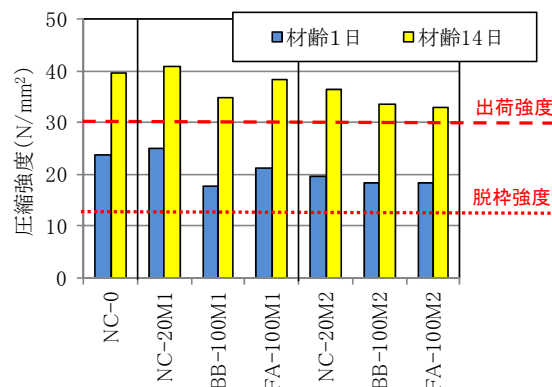


図-3.1 圧縮強度試験結果

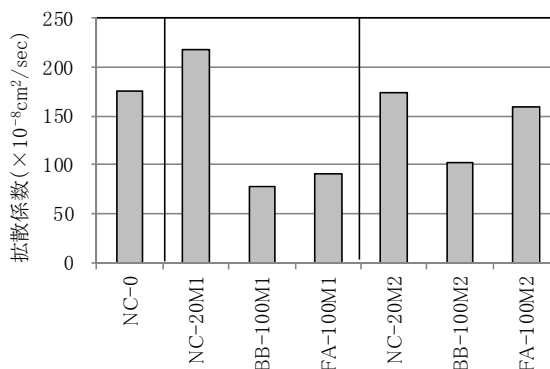


図-3.2 塩化物イオン拡散係数

さとの関係から塩化物イオン拡散係数を推定する³⁾。

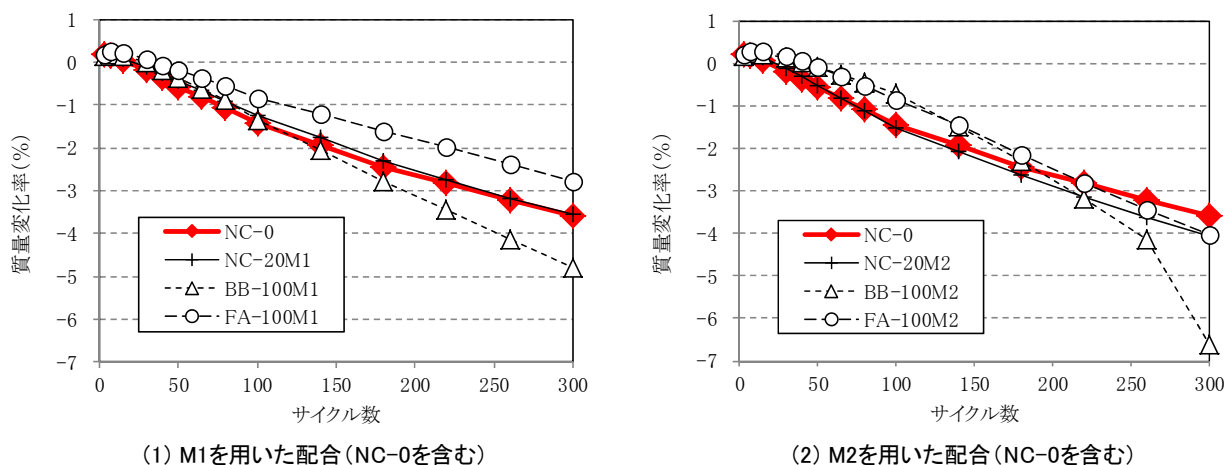


図-3.3 凍結融解試験結果(質量変化率)

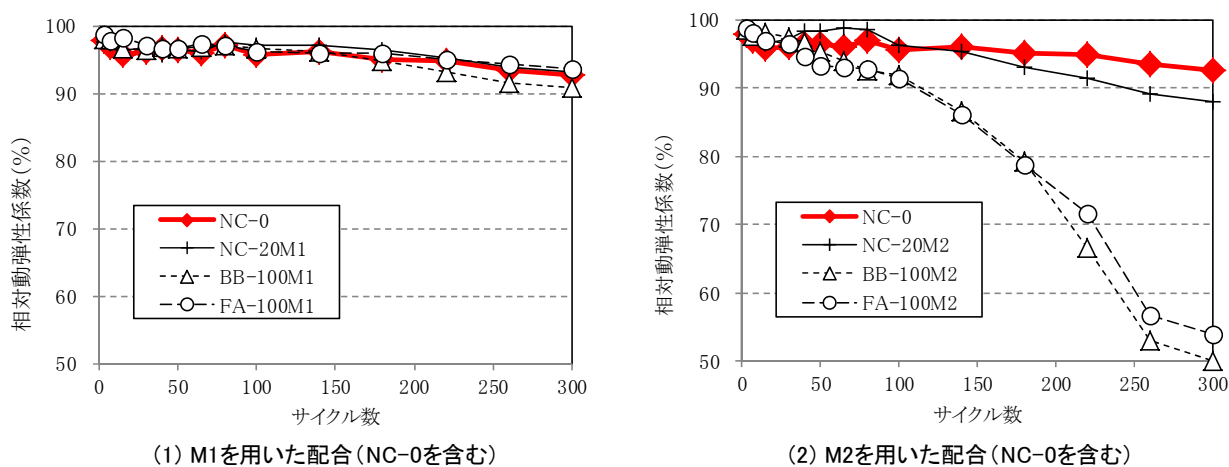


図-3.4 凍結融解試験結果(相対動弾性係数)

凍結融解試験はJIS A 1148に従って300サイクルまで実施した。ただし、凍結防止剤散布地域の耐凍害性を評価する観点から、供試体を格納するゴム容器内に入れる水を3%NaCl溶液とした。供試体は1配合あたり3体とした。

3.3 実験結果

圧縮強度試験結果を図-3.1に示す。いずれの配合でも良好な強度発現が確認できた。

非定常・電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数を図-3.2に示す。再生粗骨材を20%用いた配合ではNC-0と概ね同程度の拡散係数となった。一方で、高炉セメントやフライアッシュを使用した配合では再生粗骨材を用いた配合でも拡散係数を低減できることがわかった。

凍結融解試験結果として質量変化率を図-3.3に、相対動弾性係数の変化を図-3.4に示す。これらの図はM1を使用した配合とM2を使用した配合とを分けて示した。

図-3.3の質量変化率では、M1,M2とも高炉セメント

(BB)を使用した配合で質量減少がやや大きくなった。特に、BB-100M2の配合では、200サイクル以降で質量減少が急に大きくなっているが、これは、写真-3.1に示すように、供試体の角の部分がひび割れの進行で剥落した影響が大きく、供試体表面のスケリングそのものは、他の配合よりも多少大きい程度であった。

図-3.4の相対動弾性係数では、BB-100M2とFA-100M2の配合で相対動弾性係数が低下する結果となった。これらの配合では写真-3.1に示すように、供試体にひび割れが確認されており、再生粗骨材に起因した劣化と考えられる。この配合に使用した再生粗骨材M2のFM凍害指数は表-3.1に示すように0.12である。「JIS A 5022 再生骨材Mを用いたコンクリート」の耐凍害品に使用できる再生粗骨材の規格値(FM凍害指数0.08以下)を満足しておらず、このような再生粗骨材を凍結防止剤散布地域に使用すると、凍害による劣化のリスクが高くなることが確認できた。一方、FM凍害指数が0.07と規格値を満足した再生粗骨材M1を用いた配合では、



写真-3.1 凍結融解試験後の供試体の劣化状況

相対動弾性係数の低下は見られなかった。

今回の結果から、凍結防止剤散布箇所では、再生粗骨材の耐凍害性をしっかりと確認することが重要であることが分かった。

なお、再生粗骨材の耐凍害性を評価する再生粗骨材Mの凍結融解試験方法（JIS A 5022 附属書D）は、一般的な凍害環境を想定したものであり、凍結防止剤地域のように、塩化物の影響でスケリング劣化が急速に進行する環境条件に対しては、試験方法や規格値を見直す必要もあると考えられ、今後、検討する予定である。

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

再生骨材は解体されたコンクリートの旧モルタル分（写真-4.1）の影響を受けるため、天然の骨材に比べ一般的に吸水率が大きい。吸水率が大きい再生骨材をコンクリートに用いると、乾燥収縮は大きくなる。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、乾燥収縮により発生するひび割れが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 28 年度は、乾燥収縮への影響について基礎的な知見を得るため、3 種類の再生粗骨材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。

4.2 使用材料と配合

表-4.1 に使用材料を示す。粗骨材は、宮城産の低品質再生粗骨材 L、同じく宮城産中品質の再生粗骨材 M、北



写真-4.1 再生粗骨材

表-4.1 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 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%)
	再生 L 宮城産再生粗骨材 L (表乾密度 2.52g/cm ³ , 吸水率 5.03%, 最大粒径 20mm, 微粒分量 2.3%)
	再生 M 宮城産再生粗骨材 M (表乾密度 2.52g/cm ³ , 吸水率 4.27%, 最大粒径 20mm, 微粒分量 1.2%)
	再生路盤材 石狩産路盤用再生骨材 (表乾密度 2.45g/cm ³ , 吸水率 5.45%, 最大粒径 20mm, 微粒分量 2.7%)
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-4.2 配合

粗骨材	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和材 (%/C)		SL (cm)	Air (%)
			W	C	S	G	減水剤	AE 剤		
普通	55	45	155	282	857	1041	0.15	0.0075	10.3	5.0
	45	43	155	344	795	1047	0.25	0.0063	9.1	4.5
再生 L	55	45	155	282	857	981	0.02	0.0075	9.0	4.2
	45	43	155	344	795	987	0.13	0.0063	8.5	4.0
再生 M	55	45	155	282	857	981	0.02	0.0075	10.4	4.5
	45	43	155	344	795	987	0.13	0.0050	10.2	4.2
再生路盤材	55	45	155	282	857	955	0.02	0.0063	10.3	4.5
	45	43	155	344	795	960	0.13	0.0038	8.3	4.2

海道石狩市で生産された路盤材を分級した再生路盤材（品質 L 相当）、比較用として小樽市見晴産の普通砕石を使用した。細骨材は苫小牧市錦多峰産の除塩海砂を使用した。

セメントは高炉セメント B 種を使用した。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。国土交通省北海道開発局のコンクリート区分を参考に、水セメント比は 55%、45%の 2 種類とし、目標スランプ (SL) は 8±2.5cm、目標空気量 (Air) 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、14、28 日に実施した。また、JIS A 1149 に準拠して静弾性係数試験も測定している。

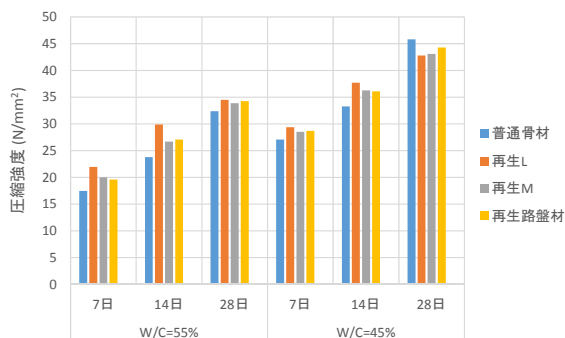


図-4.1 圧縮強度試験結果

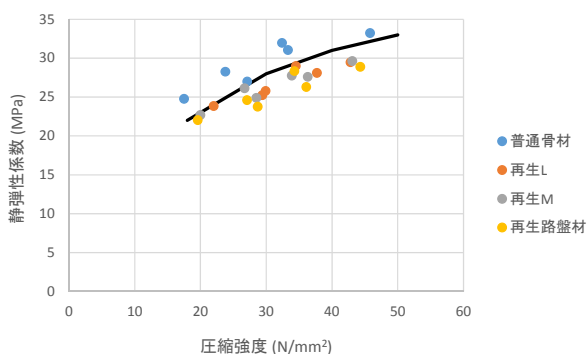


図-4.2 圧縮強度—静弾性係数関係

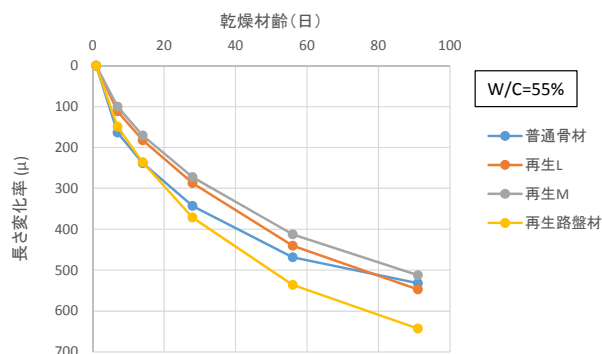


図-4.3 長さ変化率 (W/C=55%)

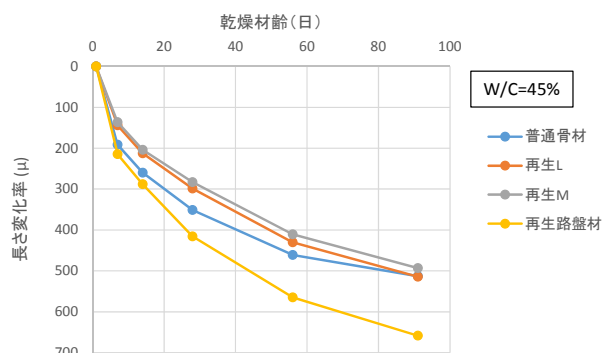


図-4.4 長さ変化率 (W/C=45%)

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°C 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。いずれの配合でも強度発現は良好であり、骨材の種類による大きな違いは見られない。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4.2 に示す。図中には土木学会コンクリート標準示方書に示される標準値も合わせて示す。普通骨材では標準値を上回った一方で、再生骨材では標準値を下回った。骨材の絶対密度を比較すると、普通骨材が 2.67 g/cm³であったのに対し、再生骨材では 2.45~2.52 g/cm³と低くなっていた。各コンクリート供試体の配合の体積比は均一であることから、粗骨材自身の弾性係数の影響で、コンクリートの静弾性係数が低くなったと考えられる。

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。乾燥開始 7 日程度の初期では普通骨材の長

さ変化率が大きい。この要因としては、再生骨材の場合、吸水率が大きいと、乾燥開始直後において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。また、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、直近では、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ている。

次に、質量変化率を図-4.5, 4.6 に示す。長さ変化率の結果と同様に、普通骨材では質量減少が途中から鈍化しており、再生骨材における質量減少量と差が生じている。表-4.1 に示した骨材の吸水率を比べると、普通骨材が 1.84%であるのに対し、再生骨材は付着モルタルの影響で 4.27~5.45%と大きい。これを乾燥収縮試験体である 10×10×40cm のコンクリート供試体で換算すると、普通骨材では 80g 程度、再生骨材では 170~210g 程度の水分量となる。両者の水分量の差は、供試体質量比換算で 1.0~1.4%程度であることから、練混ぜ時に粗骨材が保持する水分量の差が、質量減少率の差として徐々に現れてきているものと考えられる。

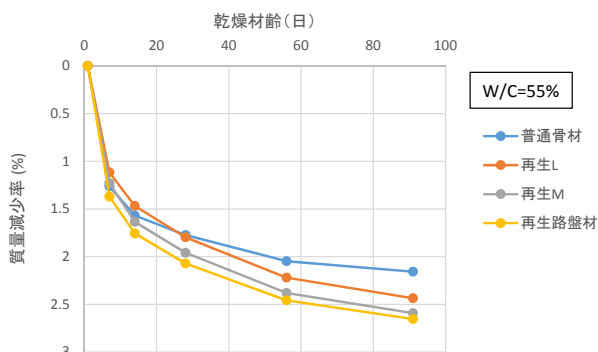


図-4.5 質量減少率 (W/C=55%)

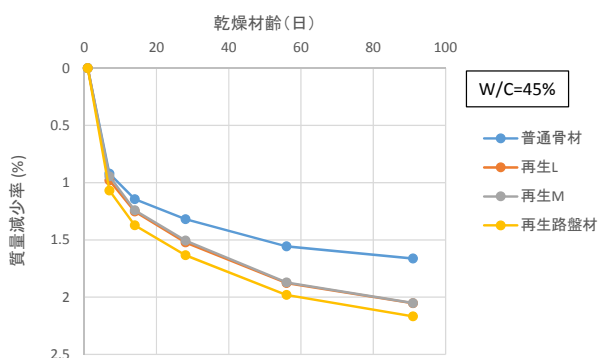


図-4.6 質量減少率 (W/C=45%)

5. 品質変動に対応した管理手法に関する検討

5.1 研究概要

コンクリート塊から生産される再生骨材は、解体前の構造物の種類や構造物の竣工年、立地地域、取り壊し部位が様々であり、その品質にはバラツキがある。しかしながら、生産された再生骨材の実質のバラツキ程度について調査した事例は少なく、コンクリートへの利用を考えた場合、そのリスク評価を行う検討材料が少ない。

そこで、平成 28 年度は、路盤用再生骨材の生産者数社から再生骨材を入手し、生産方法や原骨材の入手元をヒアリングして整理するとともに、路盤用再生骨材をコンクリートに利用することを念頭に各種骨材試験を行った。

5.2 路盤用再生骨材の解体元と製造方法

北海道内の路盤用再生骨材生産会社の協力を得て、H28 の再生骨材の生産元となるコンクリート構造物と破碎機械についてヒアリングを行った。その概要を表-5.1 に示す。札幌近郊または地方都市に位置する A~F では、解体元の構造物は建築物が多い。また、地方町村の中間処理場である G については、原コンクリートが土木解体材のみであった。施工年次はほとんどが不明であり、明確に把握できたものはなかった。

破碎は F を除いて 2 次まで行われていた。これは、路

表-5.1 路盤用再生骨材の元構造物と破碎機械

No.	中間処理場	元構造物		破碎機械	
		解体元	施工年次	1次破碎	2次破碎
1	A	不明	不明	ロールクラッシャー	インパクトクラッシャー
2	B	建築物	不明	ジョークラッシャー	インパクトクラッシャー
3	C	建築物基礎・道路二次製品基礎など	不明	ロールクラッシャー	インパクトクラッシャー
4	D	建築物解体材	1979 頃	ジョークラッシャー	インパクトクラッシャー
5	E	建築物基礎 9 割 土木材 1 割	不明 (20 年以上前)	ジョークラッシャー	インパクトクラッシャー
6	F	建築物解体材	不明	回答なし	回答なし
7	G	土木解体材	不明 (20 年以上前)	ジョークラッシャー	インパクトクラッシャー

表-5.2 再生粗骨材の物理的性質の規格値 (JIS)

種類	規格番号	品質基準	規格値			備考
			絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	
再生粗骨材H	JIS A 5021	高品質	2.5 以上	3.0 以下	1.0 以下	全てのコンクリートに使用可
再生粗骨材M	JIS A 5022	中品質	2.3 以上	5.0 以下	2.0 以下	乾燥収縮を受けにくい部材に使用可
再生粗骨材L	JIS A 5023	低品質	—	7.0 以下	2.0 以下	高い強度・耐久性が要求されない部材に使用可

盤材として使用する粒径は 40mm 以下がほとんどであり、1 次破碎では小割にするのは不可能であるため、2 次破碎する必要があるためと推察される。なお、1 次破碎はジョークラッシャーかロールクラッシャーが、2 次破碎は全てでインパクトクラッシャーが使用されていた。

5.3 コンクリート用骨材としての品質試験

5.3.1 再生骨材に関する JIS

再生骨材の JIS およびその附属書で定められた規格値のうち、粗骨材の物理的性質の規格値を表-5.2 に示す。この他にも、アルカリシリカ反応性 (以下、ASR) や塩化物量、耐凍害品に再生骨材を用いる場合に適用する凍結融解抵抗性 (FM 凍害指数) などの規格値が存在する。

5.3.2 絶乾密度

入手した再生骨材を分級して測定した各再生骨材の絶乾密度を図-5.1 に示す。建築物由来が多くを占める骨材 A~F では 20-15 mm が最大となる一方で、土木構造物由来の骨材 G では 40-20 mm が最大となった。建築物では、土木構造物と異なり、粗骨材の最大寸法 40mm のコンクリートが使われることが少なく、20~25mm 程度が

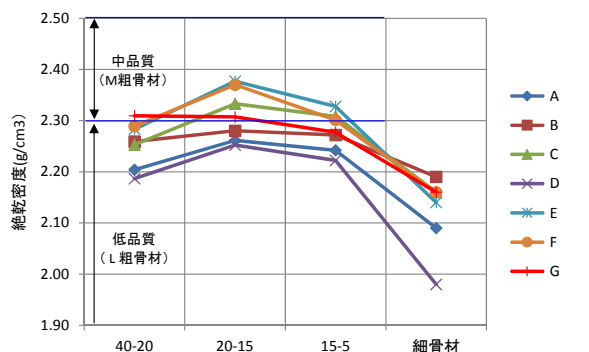


図-5.1 絶乾密度

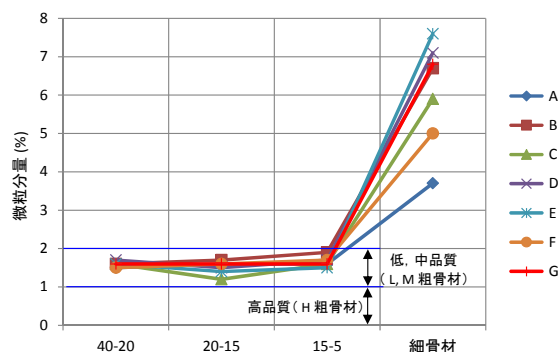


図-5.3 微粒分量

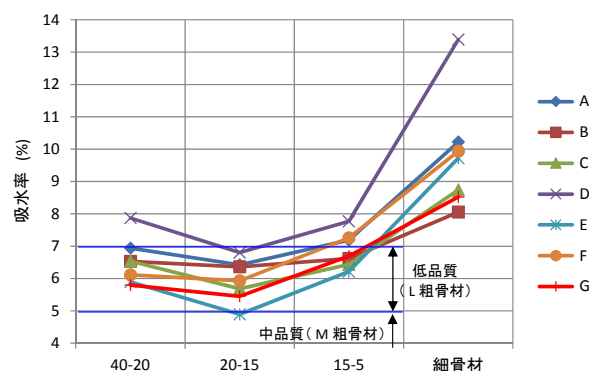


図-5.2 吸水率

指定されることから、骨材A~Fと骨材Gとの違いは、原コンクリートの粗骨材の最大寸法の影響を受けていると考えられる。一般に、乾燥したモルタル分は岩石よりも軽いため、骨材A~Fの粒径40-20mmの範囲には、付着モルタルが多量に含まれており、絶乾密度が小さくなったと考えられる。また、細骨材に相当する5-0mmの領域では絶乾密度が非常に低くなっており、同様に、モルタル分が多く含まれている可能性が高い。

5.3.3 吸水率

吸水率の測定結果を図-5.2に示す。全ての骨材で20-15mmが最小となった。絶乾密度の場合と同様に、付着モルタルの影響を受けて40-20mmの大粒径および5-0mmの細骨材において品質が悪くなったと考えられる。

5.3.4 微粒分量

微粒分量の測定結果を図-5.3に示す。今回の調査では骨材を分級してから微粒分量を計測したため、40-5mmの粗骨材に相当する粒径に着目すると、その品質は安定していた。一方、細骨材相当する5-0mmの範囲については微粒分量の変動が大きかった。

5.3.5 コンクリート用骨材としての適用性

再生路盤材を分級して、各種骨材試験を実施した結果、40-20mmの粒径において原コンクリートの構造物種類

(粗骨材最大寸法)の影響を受けて品質が悪化する場合があったものの、20-5mmの粒径に限ると、多くの骨材でL~M品質相当の再生骨材が得られた。現在、M品質の再生骨材の生産者の数は限られるが、路盤材を元にL~M品質相当品を準備して試験することで、今後、様々な再生粗骨材を用いたコンクリートの品質変動を比較検討できると考えられる。

6. まとめ

- (1) 再生骨材コンクリートのASR抑制対策の現状の問題点を整理し、旧ペースト中のアルカリがASR反応に与える影響を確認するための実験を開始した。
- (2) 凍結防止剤散布地域における再生プレキャストコンクリートに関しては、これに用いる再生粗骨材の耐凍害性を、再生粗骨材の凍結融解試験方法によって確認することが重要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、付着モルタルの影響により、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が見られた。
- (4) 再生路盤材を分級し、物理的性質を調べた結果、その変動は大きいものの、20-5mmに限ればL~M品質相当の再生粗骨材が得られた。

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、平成17年6月
- 2) 高橋守人、田口史雄、遠藤裕文：凍結融解と塩化物による複合劣化に対するコンクリートの耐久性設計法および表面含浸材を活用した耐久性向上に関する研究、寒地土木研究所報告、第133号、2001.3
- 3) プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き(案) [断面修復工法]、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、2009

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）、材料資源研究グループ、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 28 年度は、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に対し劣化・再生を複数回繰返し、アスファルト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（以下、再生混合物）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。特に都市部の一部地域では、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が低下した場合は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。また、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、アスファルトコンクリー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 28 年度は、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に対し劣化・再生を複数回繰返し、アスファルト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再生混合物以外への利用拡大の検討として、凍上抑制層材料へ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アスファルト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、アスファルト混合物（以下、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。本試験の再生アスファルトおよび混合物は、新規アスファルト・混合物を追加しない、いわゆる100%再生である。

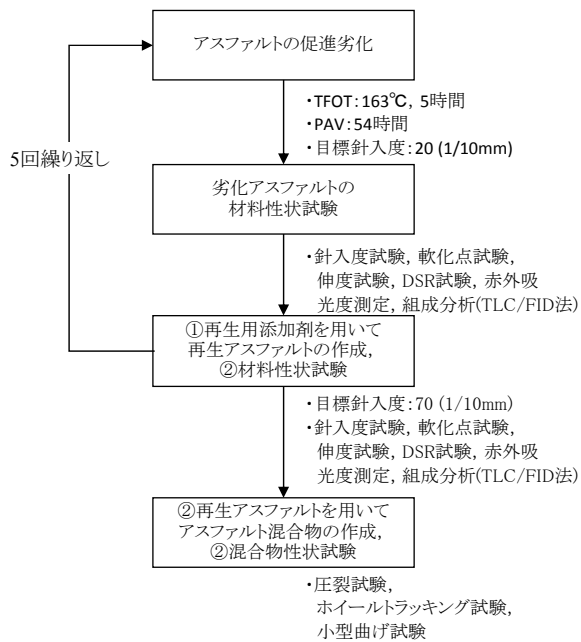


図-1 試験手順

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。再生用添加剤は一般に市販されているものであり、表-2に示す芳香族分が比較的多いものを用いた。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-3に示す。

表-1 アスファルト（ORG）の性状

密度 g/cm ³	針入度 1/10mm	軟化点 °C	伸度 15°C cm
1.037	70	46.5	100+

表-2 再生用添加剤の性状

密度 (g/cm ³)	組成 (%)			
	アスファルテン分	レジ分	芳香族分	飽和分
0.975	0.1	4.0	70.5	25.4

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

試験項目を表-4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°Cから60°C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、測定温度領域を2つ（60～40°C、30～0°C）に分け、それぞれ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。また、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。

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²⁾に準拠した。試験条件は、圧裂試験は試験温度0、20、60°C、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°C、試験回数n=1である。また、小型曲げ試験は既存文献⁴⁾の方法で実施し、載荷速度10mm/mm、試験温度-10、-5、0、5、10、15°Cの6条件、各試験温度での試験回数n=3である。なお、劣化5のみ-15°Cで試験回数n=2で行った。

表-4 試験項目

材料試験	性能指標等	混合物試験	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	わだち掘れ
伸度試験	延性、ひび割れ	小型曲げ試験	脆化点
赤外吸光度測定	酸化劣化		
組成分析試験	四成分割合		
DSR試験	動的粘弾性状		

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-5 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。

表-5 再生アスファルトの構成

	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 %	53.3 3%	46.50 %

(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。再生アスファルトは針入度 70 前後に回復させているにもかかわらず、軟化点は再生3以降、高い値に移行し、そのまま推移する傾向が見られた。

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、特に再生3回以降はほとんど回復しない結果となった。

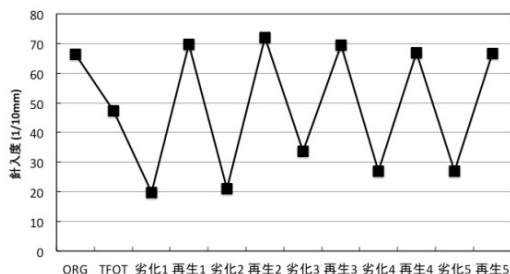


図-2 針入度

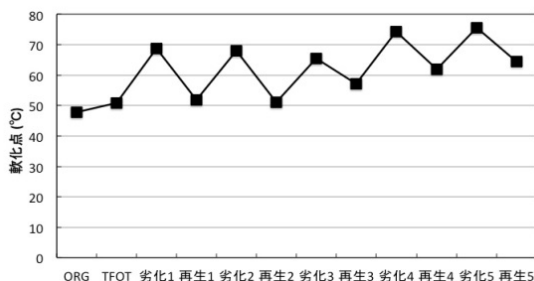


図-3 軟化点

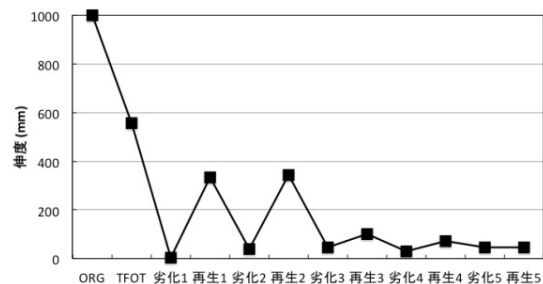


図-4 伸度

(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。

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。飽和分についてはほぼ変化がなく、アスファルテン分の変化は少なかった。レジン分および芳香族分は劣化・再生の度に増減を繰り返すが、前者は全体としては増加傾向に、後者は減少傾向から横ばいに推移した。アスファルトは一般的に、劣化が進むと芳香族分が減少し、レジン分およびアスファルテン分が増加することから、本試験においてもレジン分が増加していることが確認された。一方、再生時に芳香族分の増加しているのは、使用した再生用添加剤の成分が芳香族分の比較的多いものであることから、この影響を受けたと考えられる。

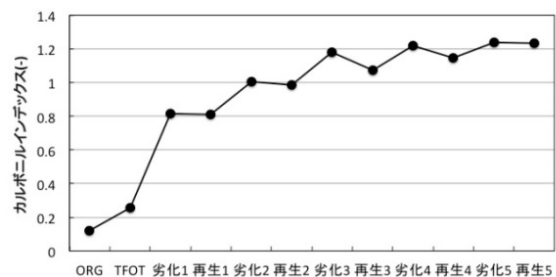


図-5 カルボニルインデックス

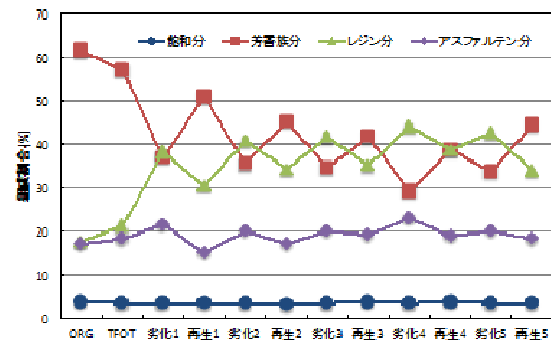


図-6 組成分析結果

(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。今回は、複素弾性率および位相角に着目した。これらの値は 10rad/s の値を採用している。複素弾性率を図-7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す。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ている。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ている。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。

位相角の推移を図-8に示す。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。

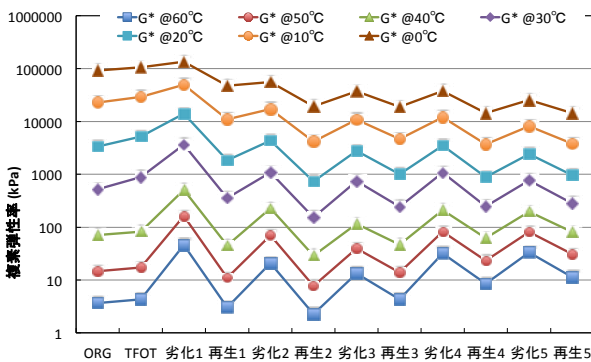


図-7 複素弾性率の推移

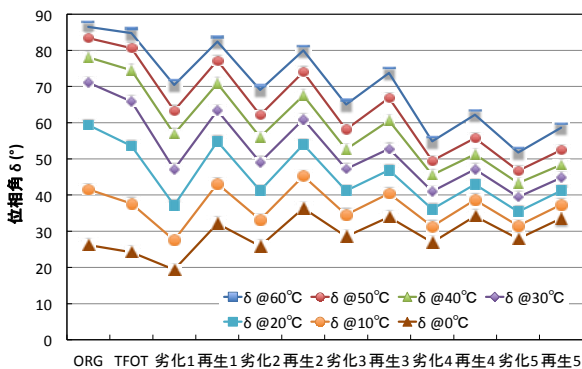


図-8 位相角の推移

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-9に示す。圧裂強度は0℃から20℃ではORGが高く、再生3・再生5は少し低い値となった。再生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。60℃ではORGと再生3の軟化点を越えることから差が見られなくなっており、再生5は軟化点を越えていないので高い値となったものと考えられた。

次に、変位を図-10に示す。再生3および再生5の変位が温度によらずほぼ横ばいになったのに対し、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。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℃をピークに凸型になった。これは既往研究⁵⁾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られた。

圧裂係数を図-11に示す。0℃のORGの変位が小さいため圧裂係数は大きい値となったが、20℃以降は再生3および再生5も近い値となった。特にORGと再生3は60℃では軟化点を越えておりほとんど同じ値となった。

0℃および60℃の圧裂強度より求まる、圧裂強度比を図-12に示す。ORG、再生3、再生5と繰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⁹⁾ことが示された。

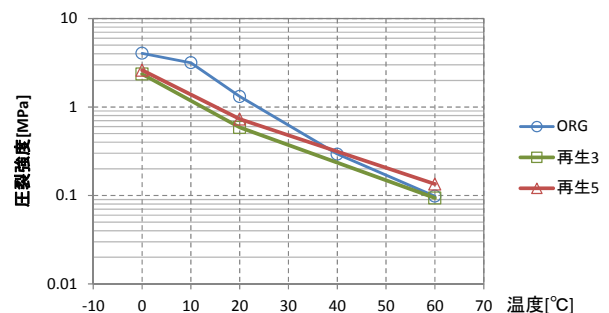


図-9 圧裂強度測定結果

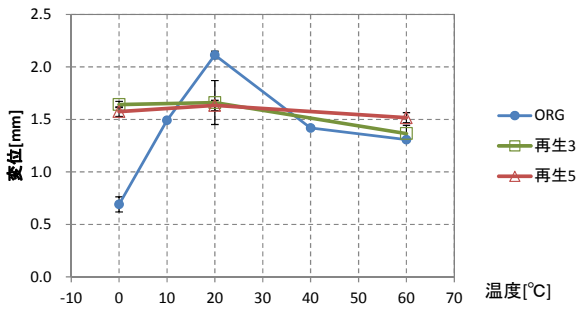


図-10 変位測定結果

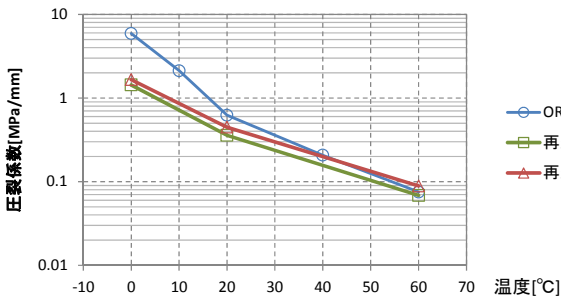


図-11 圧裂係数

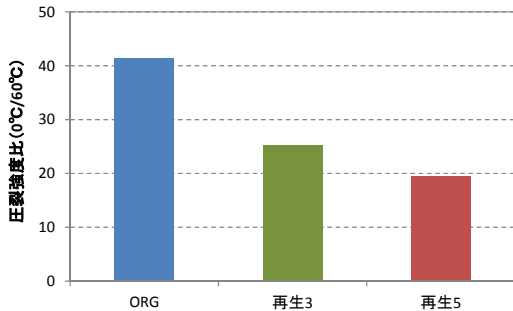


図-12 圧裂強度比

(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-6 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。

表-6 動的安定度

	無劣化	再生3	再生5
動的安定度 (回/mm)	720	3,000	7,880

(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-13 に、曲げひずみとの関係を図-14 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3が0°C、再生5が-5°Cとなった。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。

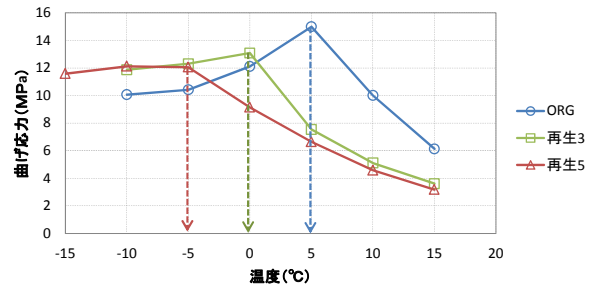


図-13 曲げ応力

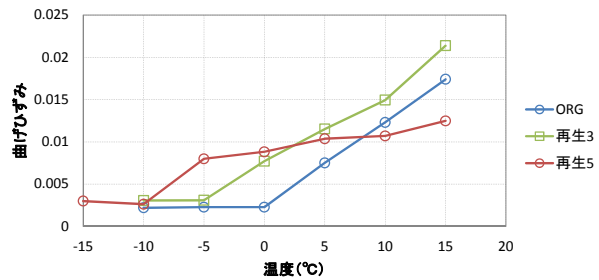


図-14 曲げひずみ

2.4 まとめ

本研究結果をまとめると次の通りである。

- 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。
- 再生アスファルトのカルボニルインデックスは、繰返し劣化・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、アスファルトの組成分析の結果、レジン分および芳香族分は劣化・再生の度に増減を繰り返すが、前者は全体としては増加傾向、後者は減少傾向から横ばいに推移した。この芳香族分の推移は、再生用添加剤の成分による影響と考えられた。
- 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30~60°以内に収束し、温度毎の位相角の差が小さくなる傾向となった。これは、感温性の低下が考えられた。

- 4) 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考えられた。また、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、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た。

3. 積雪寒冷地のアスファルト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コンクリー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アスファルト再生骨材の品質変動について、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としての適用性を検証するため、試験施工を実施した結果について述べる。

3.1 積雪寒冷地のアスファルト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值である針入度20(1/10mm)以下まで、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-15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。

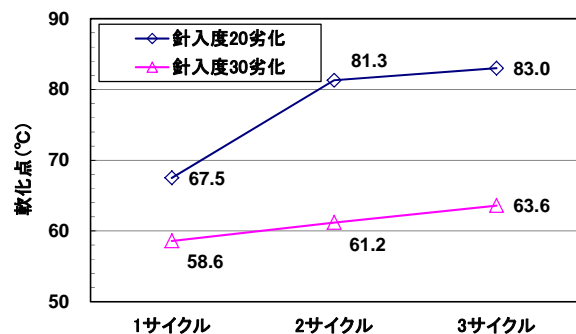


図-15 繰り返し利用における軟化点の推移

図-16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-15の室内試験における傾向と一致する。

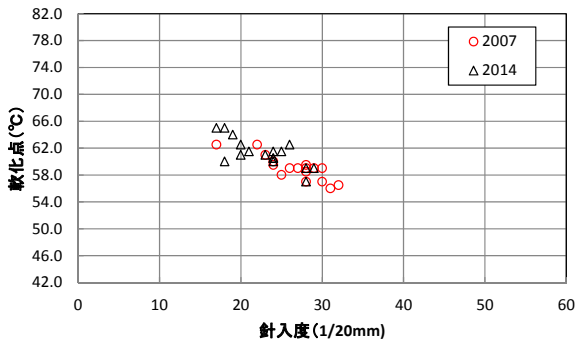


図-16 針入度と軟化点

(2) 針入度と脆化点

図-17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-18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きていることが推測される。なお、この傾向は図-17の針入度30劣化の傾向と一致している。

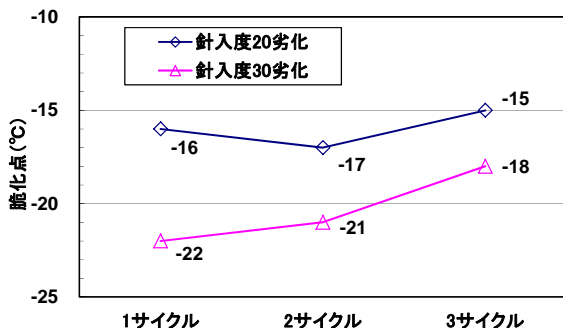


図-17 繰り返し利用における脆化点の推移

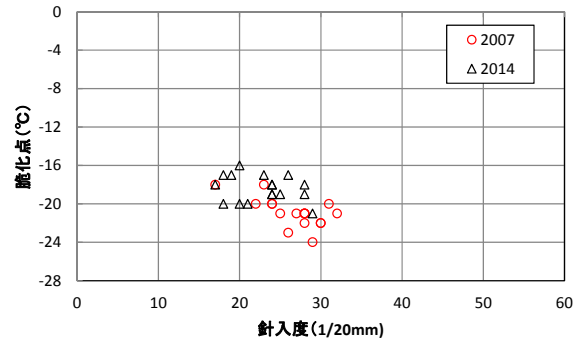


図-18 針入度と脆化点

(3) 針入度と圧裂係数

図-19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き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。

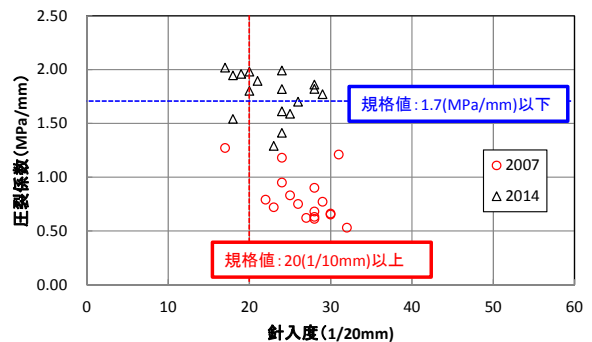


図-19 針入度と圧裂係数

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 アスファルト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、常温のアスファルト再生骨材（以下、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。本年度は、凍上抑制層材料としての利用方法について、材料温度と支持力の関係について基礎的な検討を行った結果を報告する。

3.2.1 再生骨材の性状

舗装発生材の発生量が使用量を上回っている北海道北部地域の再生アスファルトプラントより採取したアスファルト再生骨材の性状を表-7に示す。採取したアスファルト再生骨材は、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-7 アスファルト再生骨材の性状

試験項目	単位	アスファルト再生骨材	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℃)	%	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 支持力の評価

アスファルト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、アスファルト再生骨材は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 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アスファルト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-20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。

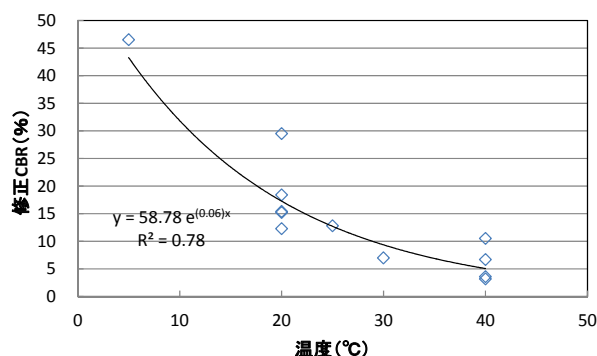


図-20 修正 CBR と温度の関係

(2) DCP 試験

表-7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-21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。

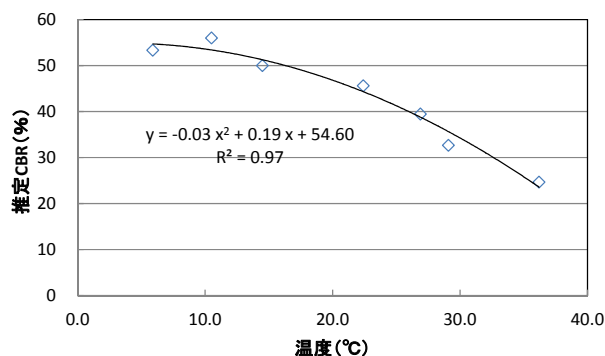


図-21 推定 CBR と温度の関係

(3) FWD 試験

表-7に示した材料と切込碎石 80mm 級を凍上抑制層材料として用い、図-22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-23に示す。アスファルト再生骨材は切込碎石と比較して 20~40 μm 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 D_0 たわみ量が高い値となっているが、同様の傾向が切込碎石においても見られる。

D_0 たわみ量による評価では、気温が高い夏期において舗装表面のアスファルト材料のたわみの影響を大きく受ける可能性が考えられるため、路盤および路床の支持力を評価する BCI (D_{600} たわみ量 - D_{900} たわみ量) を用い評価を行った。結果を図-24 に示す。BCI は1年を通して概ね $30\mu\text{m}$ 程度であり、夏期においてもアスファルト再生骨材と切込碎石の支持力に差異は見られなかった。

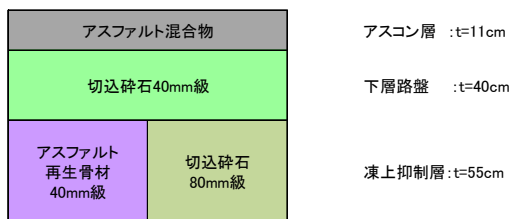


図-22 評価断面

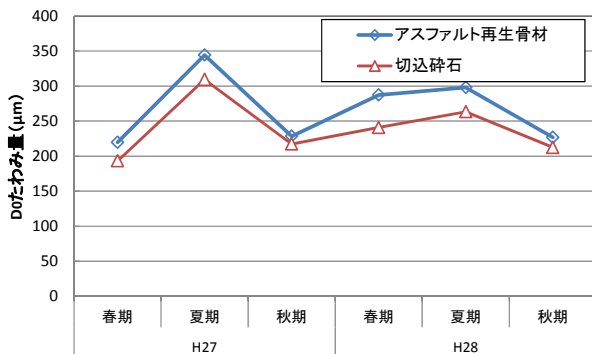


図-23 FWDによる D_0 たわみ量

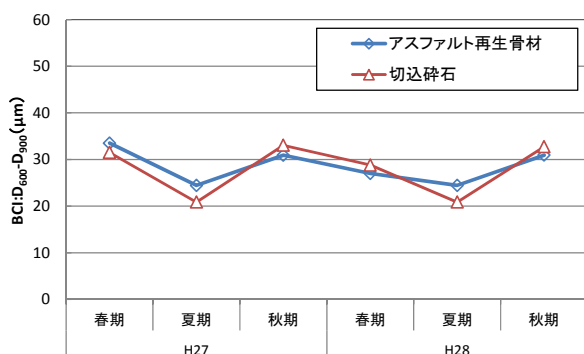


図-24 BCI

3.2.3 路床材料としてのCBRの検討

修正CBRおよびDCP試験の結果より、温度が上昇す

ると支持力が低下する傾向が見られたことから、実道における凍上抑制層温度の把握を行った。北海道北部地域の国道に設置した舗装内温度計の測定結果を図-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°C まで達していない状況であった。

アスファルト再生骨材は図-21に示したとおり 30°C 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。

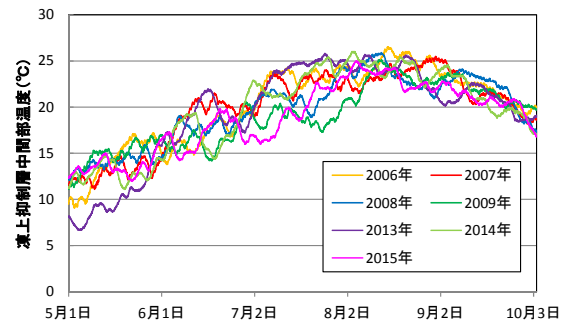


図-25 R238 稚内の凍上抑制層温度

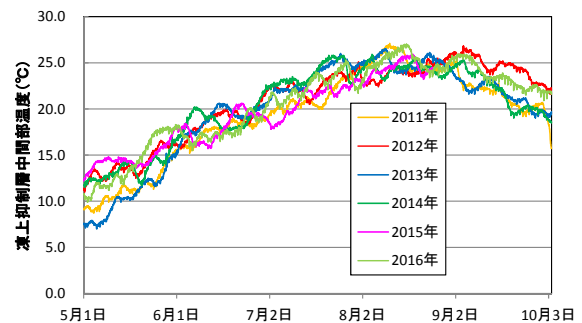


図-26 R231 留萌の凍上抑制層温度

3.2.4 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は、アスファルト再生骨材を切込碎石と同等の支持力が期待できる凍上抑制層材料として、利用できる可能性が示唆された。なお、実際の利用にあたっては、品質のばらつきが考えられるため、支持力確認を行う必要があると考える。

4. まとめ

平成28年度は、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に対し劣化・再生を複数繰り返し、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、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びは回復しなかった。
- 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) アスファルト再生骨材を切込砕石と同等の支持力が期待できる凍上抑制層材料として、利用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) 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
- 5) 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
- 6) 社団法人日本道路協会：舗装再生便覧，p11，2010. 11

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、自然由来重金属等を含む建設発生土に関する合理的な対応の基本的考え方を整理した。また、基本的考え方に基づき、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を提案した。

キーワード：自然由来、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 28 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際して、これまでの対応事例を踏まえ、対応の方法を整理する。

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、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整理し、現場対応に関するフローチャートを作成した。

3. 研究結果⁵⁾

3.1 基本的考え方

公共工事における自然由来重金属等を含む建設発生土の利用に際しては、土壌汚染対策法と矛盾が生じず、かつ実際の環境影響が発現しないよう、適切な環境安全性の評価と必要に応じた対策を実施する必要がある。現場の事業実施に当たっては、様々な事業上の制約条件を勘案して対応方法を考える必要があるが、対応の基本的考え方を以下に整理した。またそれに基づく対応の概要を図-1 に、詳細フローチャートを図-2 に示す。

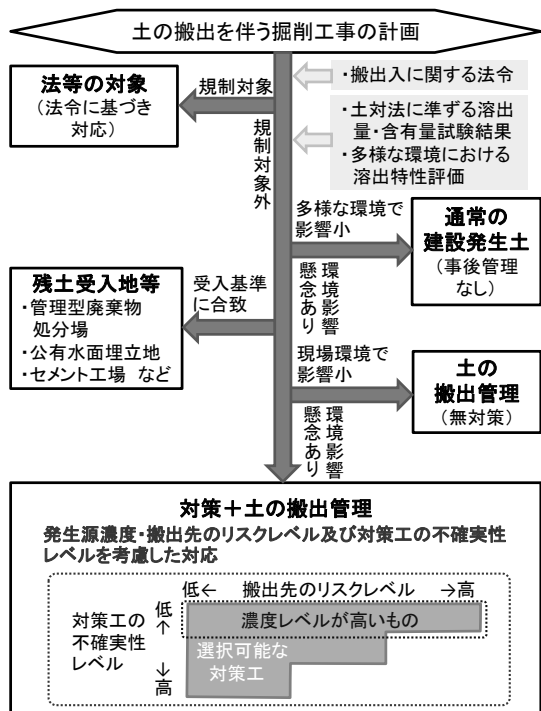
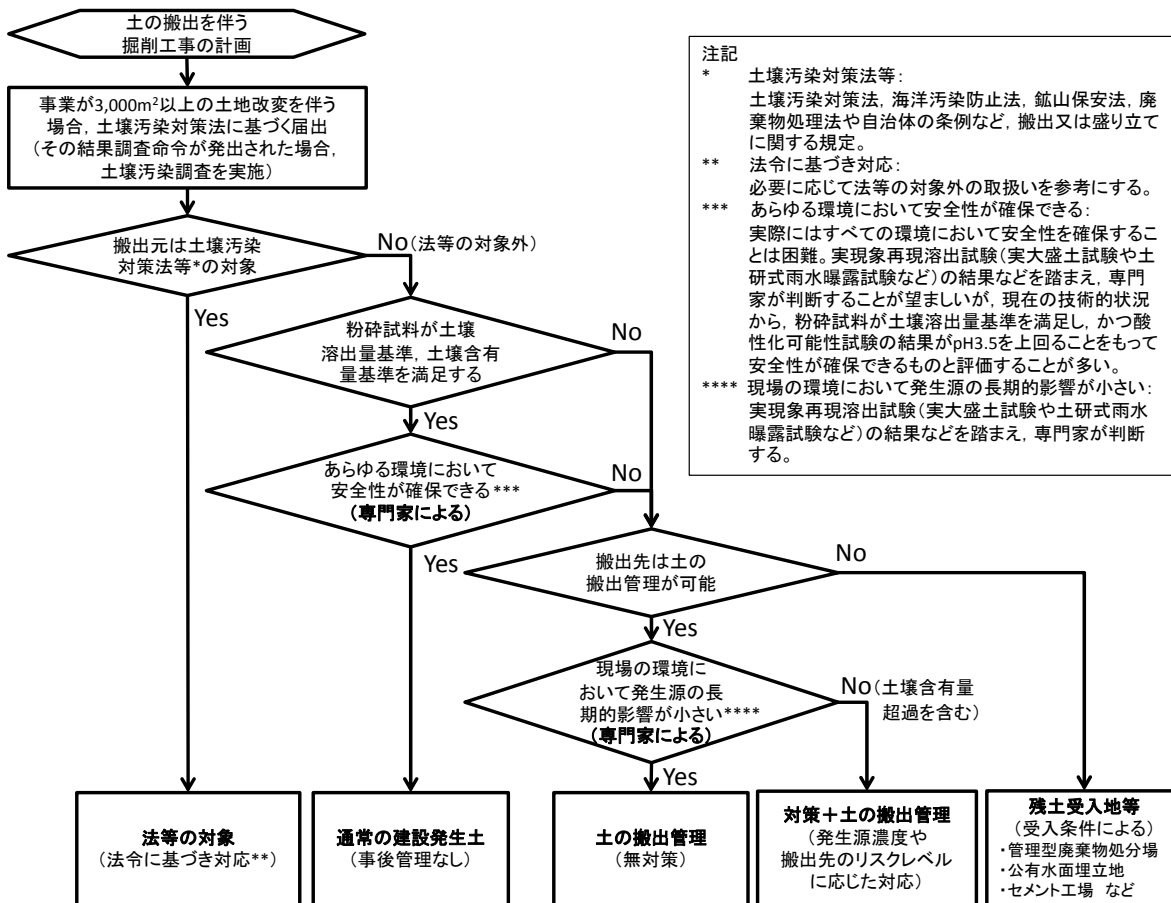


図-1 公共事業における自然由来重金属等を含む建設発生土への対応の概要 (案)

- ① 搬出入に係る法令等の規制は遵守する。
- ② 土壌汚染対策法に準ずる評価は、環境への影響の評価と異なる場合がある。そのため、通常の建設発生土として搬出する場合に求められる環境安全品質は、土壌汚染対策法の基準を満足するだけでは不十分で、理想的にはあらゆる環境条件において、人の健康や周辺環境への影響が小さいものでなければならない。
- ③ 受入基準に合致していれば、残土受入地等へ搬出できる。
- ④ 通常の建設発生土として搬出できず、かつ残土受入地等へ搬出できない発生土は、必要に応じて対策を実施しながら管理する必要がある。
- ⑤ 搬出管理が行われる場合においては、実質的に環境への影響が防止できれば良いと考えられる。そこで現場の環境条件において、人の健康や周辺環境への影響が小さいと考えられる場合は、その発生土は無対策で利用できる。
- ⑥ 現場環境において環境への影響が懸念される場合は、対策を行った上で、搬出管理及び必要な監視を実施することで、盛土等へ利用できる。その際、発生源



注記
 * 土壌汚染対策法等：
 土壌汚染対策法、海洋汚染防止法、鉱山保安法、廃棄物処理法や自治体の条例など、搬出又は盛り立てに関する規定。
 ** 法令に基づき対応：
 必要に応じて法等の対象外の取扱いを参考にする。
 *** あらゆる環境において安全性が確保できる：
 実際にはすべての環境において安全性を確保することは困難。実現象再現溶出試験（実大盛土試験や土研式雨水曝露試験など）の結果などを踏まえ、専門家が判断することが望ましいが、現在の技術的状況から、粉砕試料が土壌溶出量基準を満足し、かつ酸性化可能性試験の結果がpH3.5を上回ることをもって安全性が確保できるものと評価することが多い。
 **** 現場の環境において発生源の長期的影響が小さい：
 実現象再現溶出試験（実大盛土試験や土研式雨水曝露試験など）の結果などを踏まえ、専門家が判断する。

図-2 公共事業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詳細フローチャート (案)

濃度、搬出先のリスクレベルと対策工の不確実性レベルを考慮して対応方法を選択するのが合理的である。

- ⑦ 人家や飲用井戸の近傍の土地には、万一重金属等が地下水へ移行した際の影響が大きいので、要対策の発生土を置かないことが望ましい。

3. 2 搬出入に係る法令等の規制

発生土は、①搬出入に係る法令等の規制、②発生土の性状によってその搬出先が制約される。搬出元が土壤汚染対策法、鉱山保安法、廃棄物処理法等の指定を受けている場合や、発生土の移動に関して自治体の残土条例等の規制を受ける場合は、これらの法令等に従うこととなる。そうでない場合は基本的に法令の対象外であって、事業者が発生土の性状に応じて自主的に対応を決定することとなる。ただし対応に当たっては、人の健康や環境への影響に加えて、搬出した土が将来、土壤汚染対策法の規制を受ける可能性にも配慮し、適切な評価と必要に応じた対策の実施が求められる。

3. 3 通常の建設発生土に要求される環境安全品質

通常の建設発生土に要求される環境安全品質は、土壤汚染対策法に準じた評価方法で基準を満足するのみでは不十分である。なぜなら、土壤汚染対策法の方法では検液の pH を考慮せず、また短時間で実施する試験の性質上、時間を要する化学反応プロセスを考慮することができない。そのため酸性あるいはアルカリ性の浸出水による生物への影響や、液性変化に伴う重金属等の溶出について、この評価方法では評価できないからである。

ここで求められる環境安全品質は、理想的には幅広い酸化還元環境の条件において、重金属等の有害物質を溶出させず、かつ酸性やアルカリ性の浸出水を発生させないことである。ただし実際には、還元雰囲気での溶出試験方法について汎用的な試験方法が確立していない現状や、アルカリ性浸出水の環境への影響事例が十分蓄積されていないことから、土壤汚染対策法に準ずる評価に加え、酸性化可能性の評価に基づき判断することが多い。

評価に時間をかけることができる場合には、代表試料について土研式雨水曝露試験、実大盛土実験などの実現象再現溶出試験を適用し、その結果を参考にして環境安全性を評価することも行われている。

3. 4 残土受入地等への搬出

通常の建設発生土として搬出できない場合でも、残土受入地等の受入基準を満足する場合はそこへ搬出することができる。具体的には、公有水面埋立地では、一般に海洋汚染防止法の基準が適用されることが多く（その

場合は溶出試験結果の評価値が約 10 倍；ただし、海洋汚染防止法の基準と土壤汚染対策法の基準では、その試験方法が異なることに留意する）、自然由来の重金属等については多くの場合、搬出可能であると考えられる。そのほか、管理型廃棄物処分場やセメント工場などが搬出先の候補となる。

3. 5 搬出管理の必要性

通常の建設発生土として搬出できず、残土受入地等への搬出を行わない場合は、発生土の搬出管理を行う必要があると考えられる。なぜなら、搬出した発生土が仮に岩石であったとしても、将来、土壤と見なされて分析が行われる可能性があり、それが土壤溶出量基準ないしは土壤含有量基準を超過した場合には搬出者としての責任を問われる可能性があるためである。

3. 6 曝露試験における環境リスクの評価

土壤汚染対策法における人の健康への影響の考え方や、地下水環境基準値の考え方を参考にすると、曝露試験で得られる初めの 1 年間の浸出水について、重金属等の平均濃度が土壤溶出量基準値を満足する場合、現場環境において環境への影響が小さいものと考えられる。

土壤汚染対策法における人の健康への影響の考え方は、地下水を毎日 2 リットル、70 年間飲み続けた際に、人の健康への影響が生じると考えられる重金属等の濃度を基準値としている。土研式雨水曝露試験や、実大盛土試験などの曝露試験では、実環境に近い状態での浸出水の時間変化に関する情報が得られる。これらの結果によると、一般に浸出水濃度は初期に高く、時間とともに濃度が減衰する。そこで初期の 1 年間の平均濃度を土壤溶出量基準値と比較することは、土壤汚染対策法の考え方に比べて十分に安全側であると考えられる。また、平均する期間を 1 年間とした理由は、地下水環境基準が 1 年間の地下水濃度の平均値を基準値と比較することに倣ったものである。

3. 7 現場環境において環境への影響が小さいと考えられる場合の対応

現場環境において環境への影響が小さいと考えられる場合は対策工を実施する必要はなく、土の搬出管理だけを行えば良いと考えられる。ただし、土壤含有量基準値を超える発生土については覆土により、重金属等を含む土が表面に露出しないようにする必要がある。

3. 8 現場環境において環境への影響が懸念される場合の対応

現場環境において環境への影響が懸念される場合は、対策工を実施した上で、土の搬出管理を行う必要がある。

その際、発生源の濃度が高いほど、対策工に不備があった際の地下水汚染リスクは大きくなる。また、対策工法は様々な方法が提案されており、実際に現場で施工もされているが、方法ごとにその不確実性の程度が異なると考えられ、不確実性が大きい工法ほど地下水汚染リスクが大きい。さらに、搬出先の周辺状況によって、そのリスクの程度が異なると考えられ、基本的には搬出先が人家や飲用井戸から近いほどリスクが大きくなる。そこで発生源濃度、搬出先のリスクレベルと対策工の不確実性レベルを考慮した対応を行うことを提案する。図-3 にやや詳しいフローチャートを示す。

対策工の不確実性レベルの評価例を表-1 に示す。ここでは対策工をその不確実性レベルによって3つに分類した。また、その不確実性の要因などをあわせて記した。

不確実性レベルⅠ（低い）として、土壌汚染対策法に基づく二重遮水工、遮断工、及びこれらの構造等に準じた底面遮水工を挙げた。これらは法令にその方法の規定があるので不確実性が低いものと考えられる。

不確実性レベルⅡ（普通）として、一重遮水工を挙げた。これらは法令にその方法の規定があるために不確実性は大きくないものの、一重であることにより二重の場

合より不確実性が高いものと考えられる。

不確実性レベルⅢ（やや高い）として、不溶化工法、転圧による浸透抑制及び吸着層工法を挙げた。これらは法令等に詳しい規定がないなどから、不確実性がやや高いものと考えられる。

搬出先のリスクレベルの評価例を表-2 に示す。ここでは、搬出先のリスクレベルを4つに区分し、あわせて搬出先の状況の具体例を示した。

搬出先のリスクレベルA（低い）は、仮に搬出先から地下水汚染が生じた場合に、汚染地下水が一定濃度で到達する範囲に人家や飲用井戸がなく、それらが新たに立地する余地がないなど、今後も地下水が飲用される可能性がきわめて低い場合を想定している。

搬出先リスクレベルB（普通）は、仮に搬出先から地下水汚染が生じた場合に、汚染地下水が到達する範囲に人家や飲用井戸が存在しない場合を想定している。

搬出先リスクレベルC（高い）は、仮に搬出先から地下水汚染が生じた場合に、汚染地下水が到達する範囲に人家や飲用井戸が存在する場合を想定している。

搬出先リスクレベルD（非常に高い）は、搬出先に隣接するか、ごく近傍に人家や飲用井戸が存在する場合を

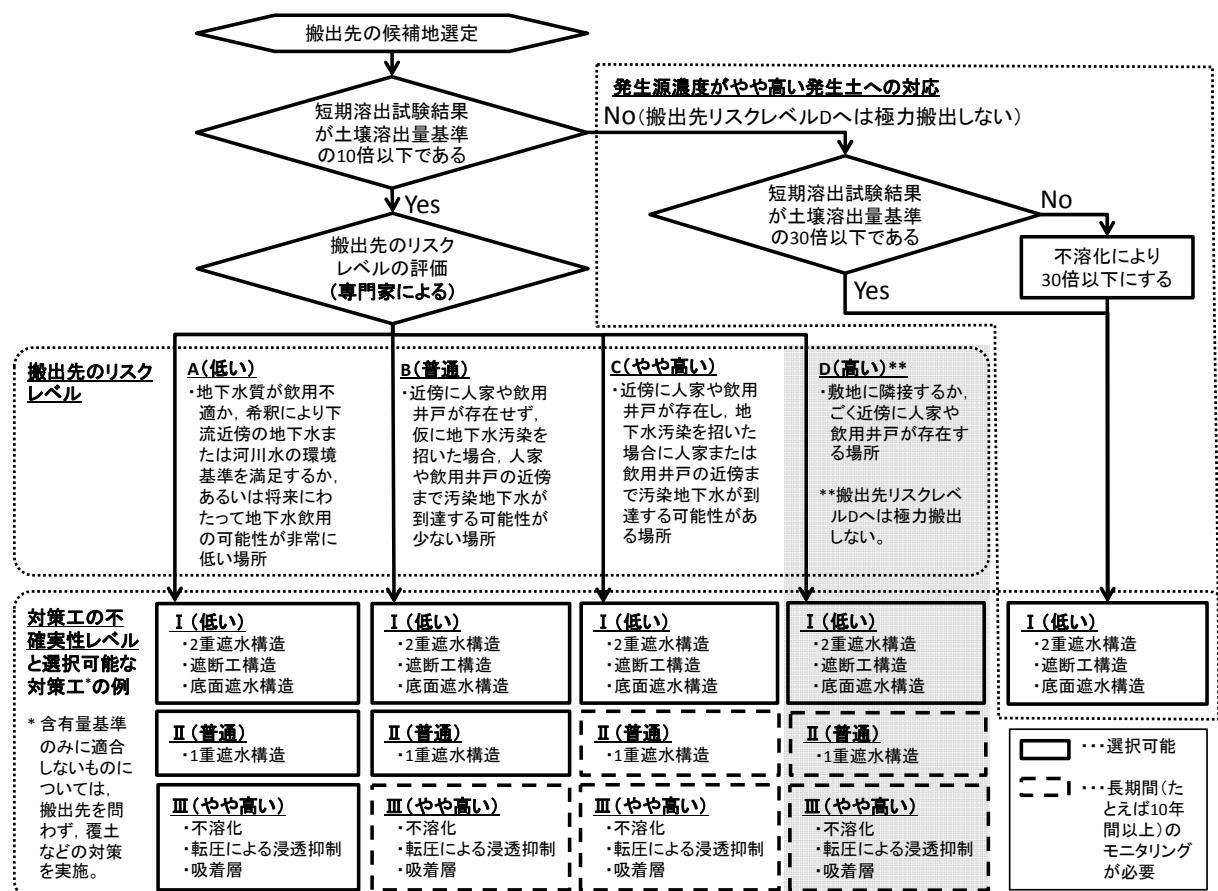


図-3 発生源濃度、搬出先のリスクレベル及び対策工の不確実性レベルを考慮した対策工選定フローチャート(案)

表-1 対策工の不確実性レベルの評価例

不確実性レベル	対策工種の例	不確実性の要因	備考
I (低い)	<ul style="list-style-type: none"> 二重遮水工 遮断工 底面遮水工 	<ul style="list-style-type: none"> 方法が概ね確立されており、施工や管理が丁寧に行われていれば不確実性は低い 底面遮水工は水質管理ができるので不確実性が低い 	<ul style="list-style-type: none"> 遮水材がシートの場合、構造物の安定性に劣る 遮水材が粘性土の場合、施工管理が難しい
II (普通)	<ul style="list-style-type: none"> 一重遮水工 	<ul style="list-style-type: none"> 二重遮水工より不確実性が高い 	
III (やや高い)	<ul style="list-style-type: none"> 不溶化 	<ul style="list-style-type: none"> 材料の長期耐久性に関する不確実性 発生土の不均質性、物理的・化学的变化に由来する不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> 地質調査の詳細化、曝露試験の実施などで発生土に由来する不確実性を低減できる
	<ul style="list-style-type: none"> 転圧による浸透抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 発生土の不均質性、物理的・化学的变化に由来する不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> 地質調査の詳細化、曝露試験の実施などで発生土に由来する不確実性を低減できる
	<ul style="list-style-type: none"> 吸着層 	<ul style="list-style-type: none"> 浸透特性に関する設計や管理方法が確立していないことに関する不確実性 材料の長期耐久性に関する不確実性 発生土の不均質性、物理的・化学的变化に由来する不確実性 	<ul style="list-style-type: none"> 吸着層工法の設計法や施工管理方法の詳細な検討により不確実性を低減できる 天然で安定であることが既知の材料を使用することで材料に由来する不確実性を低減できる 地質調査の詳細化、曝露試験の実施などで発生土に由来する不確実性を低減できる

表-2 搬出先のリスクレベルの評価例

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、地下水シミュレーションの結果、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地下水シミュレーション結果などから、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

*搬出先リスクレベルDへは、極力搬出しない。

想定している。

なお、発生源濃度がやや高い場合、例えば短期溶出試験において、その濃度が土壌溶出量基準の10倍を超えるものについては、万一対策工に不備があった場合の地下水質への影響が大きいことから、搬出先の状況によらず、不確実性レベルが低い工法を選択すべきであると考えられる。

また、搬出先リスクレベルD (非常に高い) には、万一対策工に不備があった場合の影響が大きいことから、

極力搬出しないことが望ましいと考えられる。

不確実性レベルI (低い)の対策工を採用する場合は、搬出先のリスクレベルを問わず、土壌汚染対策法などを参考に、施工後2年間程度のモニタリングを実施すると良いと考えられる。

不確実性レベルII (普通) またはIII (やや高い) の対策工を採用しようとする場合は、搬出先リスクレベルを確定し、そのリスクレベルに応じてモニタリングを手厚くする (例えば通常2年間程度実施されるものを10年

間実施するなど) かどうかを検討することが望ましい。
すなわち地下水汚染リスクを、モニタリングとその結果に基づいて必要な追加対策(施工のやり直しを含む)を実施することで回避するという考え方である。

4. まとめ

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整理した。

そして発生源濃度、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、搬出先の選択および対策工の選択方法をフローチャートに整理し、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)・住鉦コンサルタント(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/ud49g70000021j2-att/splaat000000i4y1.pdf.

5) 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, 2017. (印刷中)

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、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28年度は、現状調査として、全国のアスファルト合材プラントでの中温化技術を適用した再生アスファルト混合物の製造実態についてアンケート調査を実施した。また、温度低減によるアスファルトフェームの削減効果を検証するために、室内試験にて混合時のアスファルトフェームを採取し、全粒子状物質やベンゼン可溶分の発生量を測定したので報告する。

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28年度は各都道府県の合材プラントにて中温化技術を適用した再生アスファルト混合物(以下、中温化再生アスファルト混合物)の製造実態を調べるためのアンケート調査を実施した。また、アスファルトフェームの室内測定手法の検討した。

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、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(°C)
- ・ 中温化再生アスファルト混合物の製造に伴い懸念される事項

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%と最も高かつ

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°C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°C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°Cであった。なお、最大温度は 190°C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°C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°C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最も多く、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。

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

3. アスファルトフュ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ュームの職業暴露」等について、これまでの「グループ3(人に対する発がん性を分類できない)」から「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。そのため、作業員の健康リスク低減のためにはアスファルトフュ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ュ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ュ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ュームとして発生する。フランスのLCPC(Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 現 IFSSTAR)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ュ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-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。

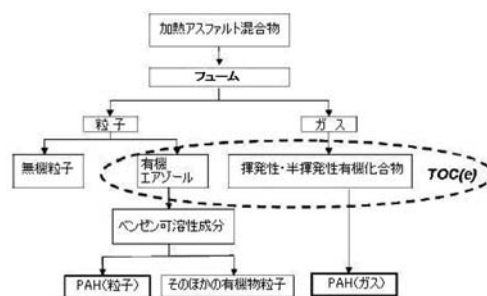


図-1 アスファルト混合物から発生する物質

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

3.3.2 装置

アスファルトフュ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ュ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2L/minとした。今年度は、アスファルトフュームとして、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2μm孔フィルタ(PTFE)を事前にジクロロメタンで洗浄
- 2) 骨材およびStAsを一定温度で混合
- 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
- 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
- 5) フィルタの重量を測定し、TPMの重量を算出

- 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
- 7) ベンゼンを 0.45 μm 孔シリンジフィルタにてろ過
- 8) ろ過したものをアルミカップに移し、40°C、7~27kPa 下で真空吸引。アルミカップの重量を測定し、BSM の質量を算出

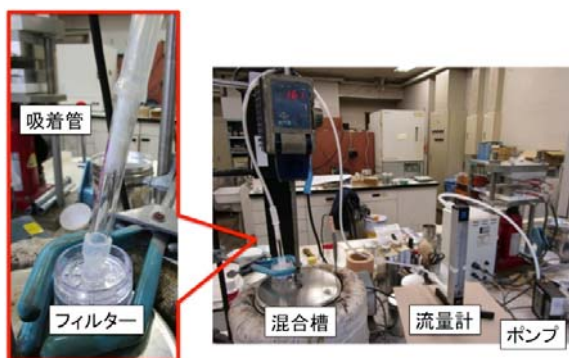


写真-1 アスファルトフェーム測定系の様子

3. 4 結果

3.4.1 フィルタの目視観察

混合温度を変えてアスファルトフェームを測定した際のフィルタの様子を表-3 に示す。混合温度が高い場合、フィルタ全体が油っぽくなり、全体的に黄色くなっていることを確認した。また、160°Cでは中央部でタール状の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。

表-3 アスファルトフェーム吸引後のフィルタの状態

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

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。

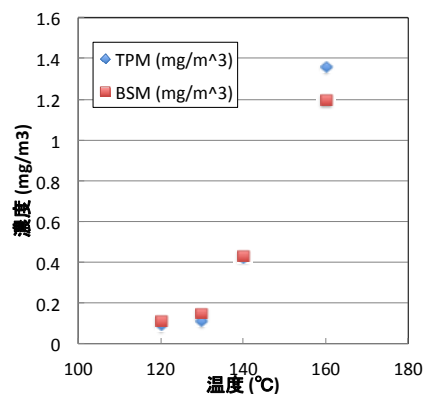


図-2 TPM および BSM 濃度

4. まとめ

平成 28 年度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ェ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。

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.

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、蒸留水と脱気水を試験溶媒として用いた連続溶出試験を実施し、酸化と還元によるヒ素・ホウ素の溶出傾向を把握した。また、盛土（酸化）と埋土（還元）を想定したバッチ吸着試験を実施し、天然材料へのヒ素・ホウ素の吸着効果を分析した。これらの結果、酸化還元電位が概ね 400mV から 300mV 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。また、酸化還元電位が概ね 400 mV から 300 mV まで低下すると、天然材料へのヒ素、ホウ素の吸着性能が低下することを確認した。

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、高額な費用をかけて処分するなど、時間的、費用的な面で事業執行上の大きな障害となっている。事業を円滑に推進するためには、自然由来重金属等を含む発生土の環境安全性の適切な評価に基づく有効利用方策が求められている。

より効率的で適正な評価に基づいた発生土の有効利用を行うため、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、対策工法として吸着層工法の研究を進めてきたが、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、不溶化工法は土質材料への適用が進んでいるが、岩石ずりへの適用が可能かどうかの検討が必要である。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。

そこで平成 28 年度は、まずヒ素・ホウ素を含む泥岩

ずりを対象に、蒸留水と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。次に、酸化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、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。粉末 X 線回折法により泥岩ずりの鉱物を分析した。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、蒸留水および脱気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。蒸留水が大気条件下で、脱気水が窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で、それぞれの溶媒に液固比 10 の割合で泥岩ずりを PVC ボトルに投入し、振とう回数 200 rpm、振とう幅 4~5 cm で 6 時間振とうした。それを 30 分間静置後、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、脱気水溶液が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、試料残渣を用いて繰り返し試験を実施し、ヒ素が環境基準値以下を示すまでの5回行った。各検液のpHをガラス電極法、酸化還元電位（Eh）を白金電極法により分析した。また、ヒ素（As）およびホウ素（B）の濃度分析にはICP質量分析法、アルミニウム（Al）および鉄（Fe）の濃度分析にはICP発光分光分析法、シリカ（SiO₂）の濃度分析にはモリブデン青吸光度法、硫酸イオン

（SO₄）の濃度分析にはイオンクロマトグラフ法、カルシウム（Ca）の濃度分析にはフレイム原子吸光法によりそれぞれ濃度を分析した。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、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。

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¹⁾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。

2.2.2 吸着試験方法

吸着試験用溶液は、蒸留水および脱気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作製した。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。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、脱気水溶液が窒素ガスを充填した簡易グローブボックス内で、それぞれの溶液に表-1に示す液固比の割合で各天然材料を投入し、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。溶液作製時と同様に固液分離した。検液中のAsとBの濃度はICP質量分析法で測定し、AlとFeの濃度は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。

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。

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

$$Kd = \frac{Q}{C} = \frac{kC^n}{C} = k \cdot nC^{n-1} \quad (2)$$

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-1 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

3. 研究結果

3.1 連続溶出試験結果

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-2に示す。表-2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-2 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 連続溶出試験結果

連続溶出試験の一覧を表-3に示す。また、酸化還元電

表-3 連続溶出試験結果一覧

試料名	項目	pH	酸化還元電位(Eh) mV	砒素 mg/l	ホウ素 mg/l	鉄 mg/l	アルミニウム mg/l	シリカ mg/l	硫酸イオン mg/l	カルシウム mg/l
泥岩蒸留水溶出 No.1	1回目	10.1	333	0.089	0.32	0.188	1.9	6.7	42.5	0.56
	2回目	9.9	348	0.047	0.13	0.139	1.16	4.7	6.3	0.8
	3回目	9.8	356	0.019	0.06	0.018	0.342	2.7	3	1.92
	4回目	9.2	368	0.008	0.05	0.02	0.213	2	2.2	4.29
	5回目	9	376	0.005	0.03	0.01	0.174	1.8	1.8	6.35
泥岩蒸留水溶出 No.2	1回目	10.1	335	0.09	0.32	0.137	0.97	7.2	43.6	0.59
	2回目	10	345	0.045	0.13	0.092	0.766	5	6.4	0.74
	3回目	9.8	362	0.019	0.07	0.018	0.305	2.8	3.2	1.94
	4回目	9.3	385	0.007	0.04	0.017	0.183	2	2.3	4.45
	5回目	9	385	0.005	0.03	0.009	0.147	1.7	1.9	6.33
泥岩蒸留水溶出 No.3	1回目	10.2	331	0.09	0.33	0.174	1.47	7	43.2	0.65
	2回目	10	350	0.046	0.13	0.119	0.992	4.8	5.9	0.85
	3回目	9.8	362	0.02	0.07	0.031	0.363	2.9	3.1	2.03
	4回目	9.4	389	0.008	0.04	0.014	0.229	2.1	2.3	4.91
	5回目	9.2	395	0.005	0.03	0.016	0.207	1.8	1.9	6.56
泥岩脱気水溶出 No.1	1回目	10.2	263	0.089	0.32	4	43.4	12.6	42	1.26
	2回目	10.2	243	0.062	0.19	3.11	28.3	8.1	8.2	0.88
	3回目	10	262	0.031	0.11	0.725	6.02	4.1	3	1.3
	4回目	9.8	290	0.016	0.06	0.338	2.84	3.3	1.8	2.63
	5回目	9.7	278	0.009	0.04	0.2	1.61	2.5	1.3	3.98
泥岩脱気水溶出 No.2	1回目	10.2	263	0.087	0.33	3.68	38.8	11.6	41.3	1.07
	2回目	10.2	244	0.063	0.21	1.99	18.2	8.8	7.9	1.1
	3回目	10	257	0.031	0.16	1.99	16	4.4	2.8	1.27
	4回目	9.8	286	0.015	0.05	0.18	1.62	2.9	1.7	2.61
	5回目	9.7	278	0.009	0.03	0.191	1.51	2.5	1.2	3.91
泥岩脱気水溶出 No.3	1回目	10.2	263	0.089	0.33	4.6	48.8	11.6	43.9	1.07
	2回目	10.1	245	0.06	0.2	1.31	12.1	9	8.2	1.07
	3回目	10	258	0.03	0.11	0.79	6.62	3.8	2.9	1.32
	4回目	9.8	285	0.015	0.04	0.239	2.05	3	1.8	2.83
	5回目	9.6	280	0.009	0.04	0.241	1.88	2.6	1.3	4.27

位と pH および各分析項目の積算溶出量との関係を図-1 に示す。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 は蒸留水と脱気水ともに 10.1~10.2 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 を示した。酸化還元電位の低い脱気水の pH は、蒸留水と比較して pH の低下が小さい傾向を示した。一方、As および B は、酸化還元電位が低下すると積算溶出量も増加した。脱気水の 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。一方、SO₄ と Ca は、SO₄ ではほとんど差は見られなかったが、Ca では脱気水と比較して高い積算溶出量を示した。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。

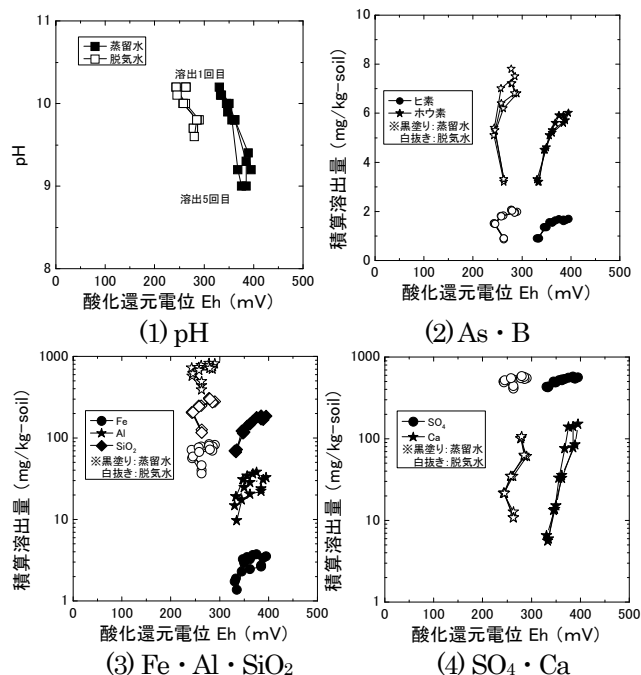


図-1 酸化還元電位と pH および各分析項目の積算溶出量との関係

3. 2 バッチ吸着試験結果

平衡液相濃度と吸着量との関係を図-2に示す。同図中には吸着等温線を示す。As では、吸着量が 0.18 mg/kg-soil~35.9 mg/kg-soil を示し、平衡液相濃度は 0.001 mg/L~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 mg/kg-soil ~27.0 mg/kg-soil を示し、平衡液相濃度は 0.55 mg/L~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。そこから、図-2 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-4 に示す(2) 式より求めた定数の一覧より Kd を算出した。

蒸留水溶液の分配係数と脱気水溶液の分配係数との関係を図-3 に示す。図-3 より、蒸留水溶液の Kd と比較して、脱気水溶液の Kd は As で約 7 割程度、B で約 2 割程度であった。すなわち、これは酸化還元電位が低下すると、天然材料への As と B の吸着性能が低下することを示唆している。

吸着試験後 Eh と吸着量との関係を図-4 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 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

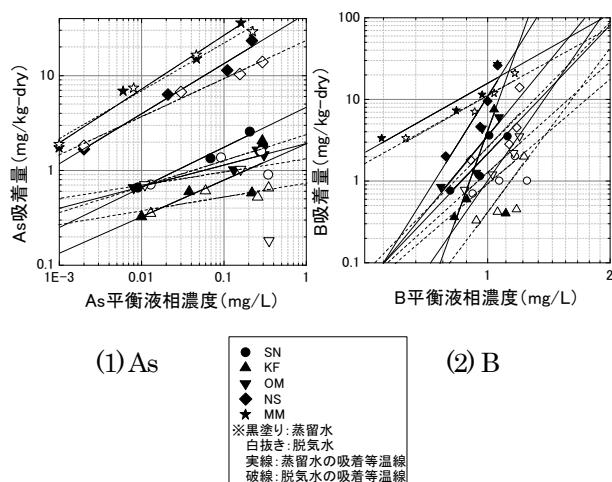
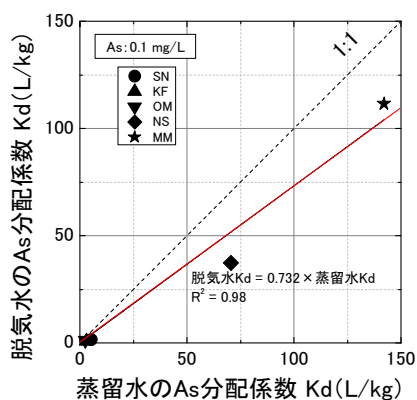


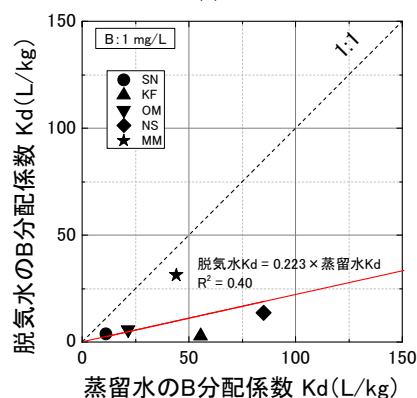
図-2 平衡液相濃度と吸着量との関係

表-4 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-3 蒸留水溶液の分配係数と脱気水溶液の分配係数との関係

液と脱気水溶液の各天然材料の最大吸着量を比較すると、As では OM を除き SN で 2.58 mg/kg-dry から 1.59 mg/kg-dry、KF で 5.76 mg/kg-dry から 0.52 mg/kg-dry、NS で 23.4 mg/kg-dry から 13.9 mg/kg-dry、MM で 35.9 mg/kg-dry から 28.9 mg/kg-dry にそれぞれ低下した。B では、すべての天然材料で脱気水溶液の最大吸着量が低下し、SN で 3.52 mg/kg-dry から 0.40 mg/kg-dry、KF で 7.52 mg/kg-dry から 2.00 mg/kg-dry、OM で 6.05 mg/kg-dry から 3.53 mg/kg-dry、NS で 26.2 mg/kg-dry から 14.1 mg/kg-dry、MM で 27.0 mg/kg-dry から 20.8 mg/kg-dry にそれぞれ低下した。

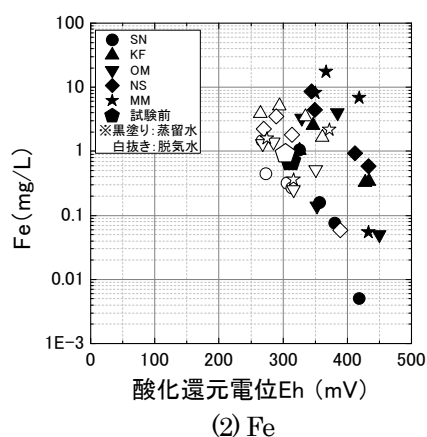
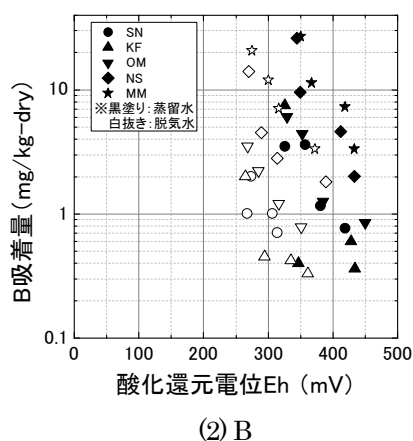
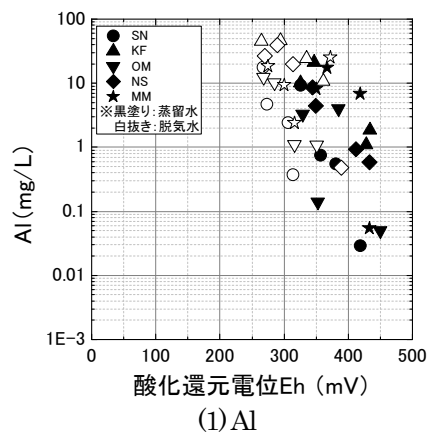
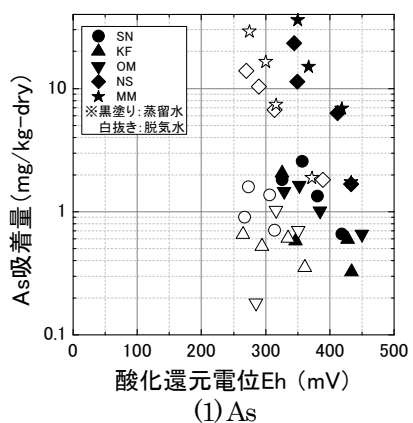


図-4 吸着試験後 Eh と吸着量との関係

図-5 吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係

また、吸着試験後の Eh と Al、Fe 濃度との関係を図-5 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、コロイドとなってろ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。

4. まとめ

本報告の結果、以下の通りである。

1) ヒ素・ホウ素を含む泥岩ずりを対象に、蒸留水と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ヒ素、ホウ素の溶出量が増加することを示唆された。今後は、引き続きより酸化還元電位が低い環境での試験を行い、ヒ素とホウ素の溶出傾向の解明を行う必要がある。

2) 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。これは、酸化還元電位が低下すると、天然材料へのヒ素とホウ素の吸着性能が低下することが示唆している。今後は、酸化還元電位がさらに低い環境下で天然材料へのヒ素やホウ素の吸着性能について検討が必要である。

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