

⑦-2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究（3）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地道路保全チーム

研究担当者：熊谷政行、丸山記美雄、
安倍隆二、三田村宏二

【要旨】

本研究では、積雪寒冷地の舗装工事におけるCO₂削減が期待できる技術として、積雪寒冷地の舗装リサイクル技術の開発および低炭素型舗装技術の開発を行うことを目的としている。本年度は、中温化舗装技術を用いた試験施工より得られたデータから、積雪寒冷地における中温化アスファルト混合物のCO₂削減効果および品質管理等の検証を行ったので、その結果を報告するものである。また、他産業廃棄物のリサイクルとして、焼却灰を主原料とした再生骨材を凍上抑制層材料としての適用性を確認するため、室内試験および試験施工を実施して検討したので、中間報告を行う。

キーワード：低炭素型社会、中温化舗装、リサイクル、CO₂削減、他産業廃棄物

1. はじめに

低炭素社会の早期実現に向け、さまざまな分野でCO₂削減技術や工法の開発が進められている。舗装分野においては低炭素化に有効と考えられる新たな技術の検討が行われており、材料の低炭素化、工事における低炭素化、資源有効利用による低炭素化などが考えられている。これら個々の舗装技術は、元々は施工効率の向上やリサイクル性能の向上などを主な目的として開発されてきており、CO₂削減の観点からの取り組みは十分とは言えない状況にある。CO₂削減の観点から技術開発を進めるとともに、適用範囲、評価方法などを明らかにしていく必要がある。

2. 積雪寒冷地の低炭素舗装技術の開発

2.1 中温化舗装技術の開発

積雪寒冷地において中温化舗装技術を用いることによるCO₂削減効果が不明確であることから、中温化アスファルト混合物の試験施工を実施し、混合物の品質・施工性および冬期のCO₂排出量削減効果の検証を行った。

平成22年度および平成23年度における中温化混合物の試験施工箇所を表-1、表-2、表-3に示す。平成22年度の試験施工は冬期6箇所、平成23年度の試験施工では夏期7箇所、冬期7箇所で行った。

水性舗装（改質H型）、粗粒度アスコン、アスファルト安定処理の6種類のAs混合物を施工した。なお、本報告では外気温5℃以上を夏期施工、5℃以下を冬期施工と定義した。

試験施工ではグリーン購入法の対象となっていない再生アスファルト混合物や改質アスファルト混合物についても、中温化混合物の活用拡大の観点から実施した。

2.2 研究方法

2.2.1 試験施工の施工条件

試験施工は夏期施工と冬期施工に分けて調査を実施し、夏期施工は外気温5℃以上の気象条件で行い、冬期施工は5℃以下の気象条件で実施した。中温化混合物の出荷温度は夏期・冬期施工ともに通常混合物と比較し30℃程度温度低減することを目標に出荷し、アスファルトプラントで使用するA重油の使用量を削減することとした。

中温化混合物と通常混合物の転圧回数や運搬時の保温対策は同じ方法で行い、施工方法は同一条件とした。図-1に試験施工の工区割を示す。通常混合物と中温化混合物は基本的に同じ車線で施工し、各工区L=100m以上の施工延長を目標とし、CO₂排出量の精度を向上させるため、As混合物重量を多く出荷することを考慮した。

表-1～3に試験施工で用いた中温化剤の種類を示す。

⑦-2 低炭素社会を実現する舗装技術の開発および評価手法に関する研究 (3)

表-1 平成 22 年度 試験施工箇所一覧 (冬期)

番号	建設部	延長(m)	幅員(m)	面積 (㎡) 混合物重量	混合物名	厚さ (cm)	施工時期	再生・新 材の区分	中温化剤の種 類
①	札幌	179	4.25~4.75	786 (72.3)	密粒度アスコン(表層)	4.0	H22.11	新材	発泡系 プラントミックス
②	釧路	100	6.25	625 (58.8)	再生密粒度アスコン(表層)	4.0	H22.12	再生20%	発泡系 プラントミックス
③	帯広	500	4.00	2,000 (141.0)	密粒度アスコン(表層)	3.0	H23.1	新材	粘弾性調整系 プラントミックス
④	室蘭	500	4.00	2,000 (230.0)	アスファルト安定処理	5.0	H23.1	新材	粘弾性調整系 プラントミックス
		96	10.00	960 (112.8)	細密粒度ギャップアスコン(表層)	5.0	H23.2	新材	滑剤系 プレミックス
		92	10.00	920 (129.2)	ポリマー改質アスファルトII型 再生粗粒度アスコン(中間層)	6.0	H23.2	新材	滑剤系 プレミックス
		88	8.25	726 (102.4)	再生粗粒度アスコン(基層)	6.0	H23.2	新材	滑剤系 プレミックス
		84	8.40	708 (146.1)	再生アスファルト安定処理(1層目)	9.0	H23.2	新材	滑剤系 プレミックス
⑤	函館	100.00	4.50	450 (42.3)	密粒度アスコン(表層)	4.0	H23.2	新材	発泡系 プラントミックス
⑥	種内	100	5.00	500 (35.3)	密粒度アスコン(表層)	3.0	H23.3	新材	滑剤系 プレミックス
		100	4.50	450 (51.8)	アスファルト安定処理	5.0	H23.3	新材	滑剤系 プレミックス
合計		2,018.90		12,808 (1284.1)					

表-2 平成 23 年 試験施工箇所一覧 (冬期)

番号	建設部	延長(m)	幅員(m)	面積 (㎡) 混合物重量	混合物名	厚さ (cm)	施工時期	再生・新 材の区分	中温化剤の種 類
①	札幌	200	4.25	850 (79.9)	再生密粒度アスコン(表層)	4.0	H23.11	再生30%	発泡系 プラントミックス
②	旭川	200	4.25	850 (79.9)	密粒度ギャップアスコン(表層)	4.0	H23.12	新材	発泡系 プラントミックス
③	室蘭	100	5.90	590 (48.4)	排水性調整系(表層) ポリマー改質アスファルトII型	4.0	H23.12	新材	発泡系 プラントミックス
④	釧路	140	6.25	875 (82.3)	再生密粒度アスコン(表層)	4.0	H24.1	再生20%	発泡系 プラントミックス
⑤	網走	169	4.60	777 (81.3)	粗粒度アスコン	5.0	H24.2	新材	発泡系 プラントミックス
		170	3.85	655 (90.9)	アスファルト安定処理	6.0	H23.12	新材	発泡系 プラントミックス
⑥	網走	220.00	5.00	1,100 (103.4)	密粒度ギャップアスコン(表層) ポリマー改質アスファルトI型	4.0	H23.11	新材	滑剤系 プレミックス
⑦	留萌	600	6.50	3,900 (458.3)	粗粒度アスコン(基層)	5.0	H23.12	新材	発泡系 プラントミックス
合計		1,799.00		9,597 (1,033.7)					

表-3 平成 23 年度 試験施工箇所一覧 (夏期)

番号	建設部	延長(m)	幅員(m)	面積 (㎡) 混合物重量	混合物名	厚さ (cm)	施工時期	備考	中温化剤の種 類
①	札幌	200.00	4.25	850 (79.9)	再生密粒度アスコン(表層)	4.0	H23.8	再生30%	発泡系 プラントミックス
②	函館	210.00	9.05 ~9.65	1,987 (162.9)	排水性調整系(表層) ポリマー改質アスファルトII型	4.0	H23.9	新材	滑剤系 プレミックス
③	旭川	94.00	3.50	329 (23.2)	密粒度ギャップアスコン(表層) ポリマー改質アスファルトI型	3.0	H23.9	新材	滑剤系 プレミックス
		142.74	18.50	2,586 (327.0)	再生密粒度アスコン(基層)(中間層)	5.0	H23.9	再生20%	発泡系 プラントミックス
④	釧路	142.74	9.25	1,320 (156.0)	再生密粒度アスコン(中間層)	5.0	H23.9	再生20%	発泡系 プラントミックス
⑤	帯広	100.00	4.25	425 (30.0)	密粒度ギャップアスコン(表層)	3.0	H23.7	新材	発泡系 プラントミックス
⑥	網走	590.00	9.45	5,576 (576.5)	細密粒度ギャップアスコン(表層) ポリマー改質アスファルトII型	4.4	H23.6	新材	滑剤系 プレミックス
⑦	留萌	157.00	6.50	1,021 (119.8)	粗粒度アスコン(基層)	5.0	H23.10	新材	発泡系 プラントミックス
合計		1,636.48		14,003 (1,475.4)					

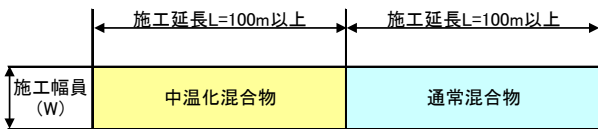


図-1 試験施工の工区割

表-4 試験施工の調査項目 (夏期・冬期)

調査項目	調査目的	調査時期	調査方法
① プラント出荷時の計測	プラント出荷時の温度の変動幅の把握	プラント出荷時	・ダンプトラックの荷台上で温度計測を行う。表面から2cm、15cmの位置において、棒状温度計を用い、5点計測を行う。 ・出荷時の温度の変動幅や運搬時の温度低下の程度を把握する。
② 現場到着時の計測	運搬時の温度低下の把握	現場到着時	・敷き均し温度の変動幅を把握する。中温化混合物工区および通常混合物工区の各18箇所を測定する。 ・サーモグラフィにより、温度の均一性を計測する。
③ 敷き均し温度の計測	敷き均し温度の変動幅の把握	敷き均し時	・サーモグラフィにより確認された温度低下箇所からコアを採取し密度を測定する。 ・舗装の端部から各工区10本のコアを採取し、密度を測定する。
④ 締固め度の計測	締固め度の把握	施工完了後	・流量計により、重油使用量を計測する。 ・骨材の温度、含水比、骨材加熱温度、およびバグフィルター内の排気温度等の計測を行う。 ・施工完了後、橋脚の位置および平坦性調査等の供用性状を把握する。
⑤ 重油使用量の計測	CO2削減量の把握	混合物の製造時	
⑥ 供用性調査	供用性状の把握	施工完了後	

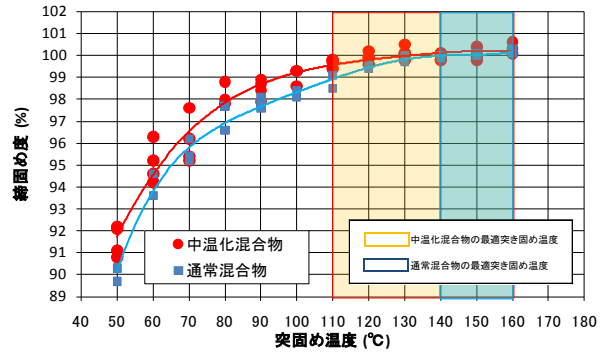


図-2 中温化混合物のマーシャル試験

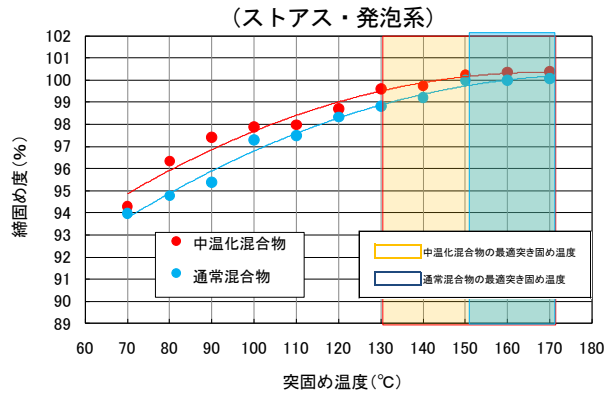


図-3 中温化混合物のマーシャル試験

(改質II型・滑剤系)

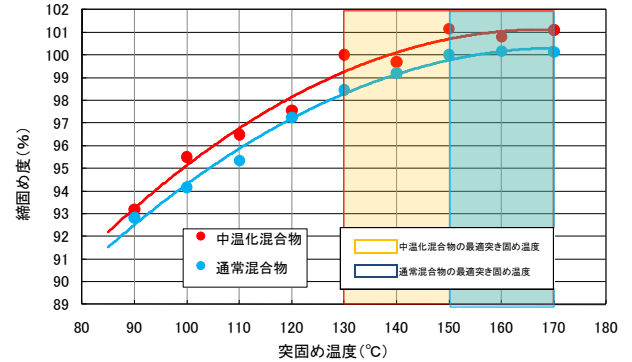


図-4 中温化混合物のマーシャル試験

(改質H型・滑剤系)

試験施工では発泡系、粘弾性調整系、滑剤系の中温化剤を使用した。中温化剤の添加方法はプラントミックスタイプとプレミックスタイプがあり、中温化剤の製造メーカーによって異なる。また、添加量についても中温化剤の種類によって異なるため、配合設計時に確認する必要がある。

2.2.2 試験施工の調査項目

試験施工の調査項目を表-4に示す。調査項目は、①プラント出荷時における混合温度、②運搬時における

As混合物の温度低下、③敷均し温度、④As混合物の締固め度、⑤CO₂削減量、⑥供用性状の把握に着目し現地調査を実施した。

本報告では、主に④As混合物の締固め度、⑤CO₂削減量の2項目に着目し報告する。

締固め度の調査については、中温化混合物工区および通常混合物工区の路肩部から均等間隔で各10個のコアを採取し(以下、定点箇所)、締固め度を比較した。また、サーモグラフィーによる敷均し温度測定を行い、周辺部と比較し温度が低下した箇所(以下、温度低下箇所)を見つけ、その箇所からコアを採取し、締固め度を比較した。

CO₂排出量はアスファルトプラントにおいて骨材を加熱するドライヤーのA重油使用量を流量計により計測し、算出した。

2.3 研究結果

2.3.1 中温化混合物の最適締め固め温度の検討

中温化混合物の混合温度は通常混合物と比較し、30℃温度低減可能とされているが、転圧温度の設定方法は定められていない。そのため、室内試験により突固め温度を変化させたマーシャル試験用供試体を作製し、締固め度と突固め温度の関係を調査した。

図-2にストレートアスファルトを用いた密粒度アスコンによる発泡系の中温化剤を用いた試験結果を示す。中温化混合物は110℃程度以上の突固め温度を確保することができれば、100%程度の締固め度を得られることを確認した。

粘弾性調整系や滑剤系の中温化剤についても同じ室内試験を実施したが、同様な結果を得ることができた。

一方、通常混合物は140℃程度以上で100%程度の締固め度が得られ、高温動粘度試験によるアスファルトの温度と粘度の関係から得られる最適突固め温度と同程度であることが確認された。

図-3にポリマー改質アスファルトII型を用いた細密粒度ギャップアスコン、図-4にポリマー改質アスファルトH型を用いた排水性舗装について同様な試験を実施した結果を示す。改質アスファルトを用いた中温化混合物は130℃程度以上の突固め温度を確保する必要があり、通常混合物は150℃程度以上の突固め温度が必要であることが確認された。

2.3.2 中温化混合物の製造・運搬・施工時の温度

図-5、図-6に夏期施工および冬期施工におけるスト

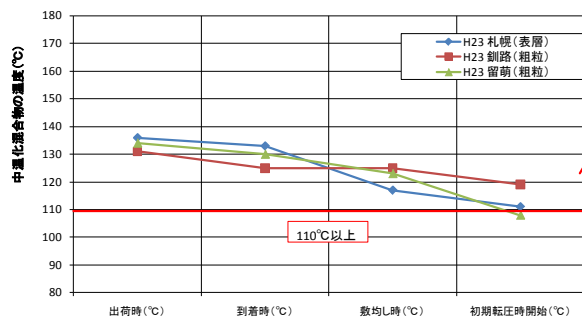


図-5 中温化混合物の製造・運搬・施工時の温度 (夏期・ストアス)

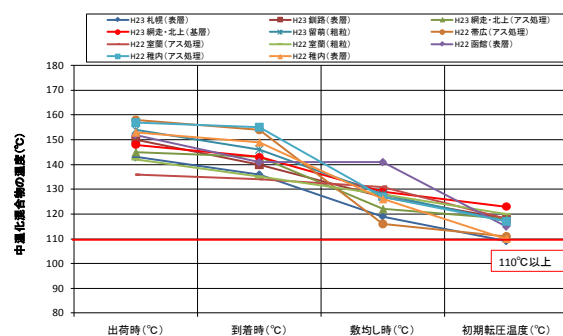


図-6 中温化混合物の製造・運搬・施工時の温度 (冬期・ストアス)

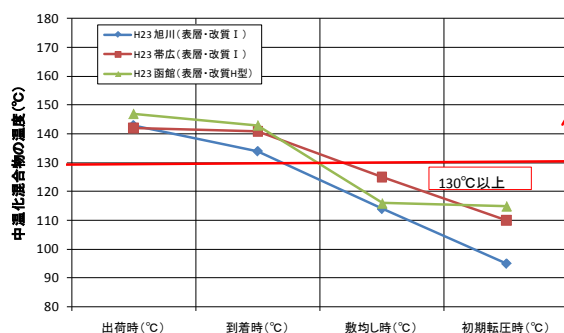


図-7 通常混合物の製造・運搬・施工時の温度 (夏期・改質アス)

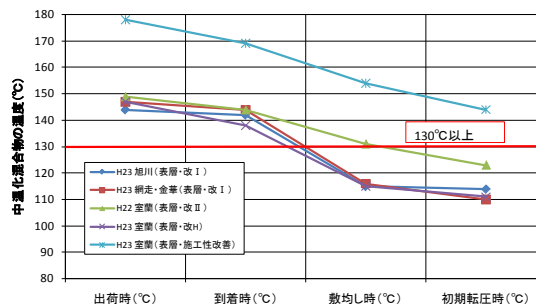


図-8 中温化混合物の製造・運搬・施工時の温度 (冬期・改質アス)

レートアスファルトを用いた中温化混合物の製造、運搬、施工時の温度変化を示す。夏期施工および冬期施工における通常混合物と比較し30℃程度低い温度で出荷した中温化混合物は、室内試験において確認した最適締め固め温度110℃以上を概ね確保されていることが確認された。

図-7、8に夏期施工および冬期施工における改質アスファルトを用いた中温化混合物の製造、運搬、施工時の温度変化を示す。夏期施工および冬期施工における通常混合物と比較し30℃程度低い温度で出荷した中温化混合物は、室内試験において確認した最適締め固め温度130℃以上を満足していない結果となった。

2.3.3 中温化混合物の締め固め度

夏期施工および冬期施工箇所から採取したコアを用い、中温化混合物と通常混合物の締め固め度を比較した。

図-9に夏期施工におけるストレートアスファルトを用いた中温化混合物と通常混合物の比較を示す。最適締め固め温度110℃以上(図-5参照)を確保し施工した中温化混合物の締め固め度は、平均値100%の締め固め度を示し、通常混合物と同程度の締め固め度を確保することができた。

図-10、11にポリマー改質アスファルトI型を用いた密粒度ギャップアスコンおよびポリマー改質アスファルトH型を用いた排水性舗装の締め固め度の比較を示す。中温化混合物は通常混合物と比較し、同程度の締め固め度を示した。転圧温度が130℃以下(図-7参照)でも締め固め度が得られた理由としては、中温化混合物の転圧温度が低下しても、夏期施工の影響からAs混合物の温度低下が遅く、十分な転圧効果が得られたと考えられる。また、夏期施工においては、サーモグラフィーにより確認された敷均し温度のムラは少なく、温度低下の影響が少ないと推察される。

図-12に冬期施工におけるストレートアスファルトを用いた中温化混合物と通常混合物の締め固め度の比較を示す。中温化混合物の初期転圧温度の平均値は110℃以上(図-6参照)を概ね確保し、通常混合物と同程度の締め固め度を有している。ただし、冬期間はサーモグラフィーにより確認された敷均し温度のムラが夏期施工と比較し多く見られた。中温化混合物工区と通常混合物工区の定点箇所と温度低下箇所からコアを採取し、締め固め度を測定した試験結果を図-13に示す。冬期間は外気温の影響による運搬時や施工時のAs混合物の温度低下が早いため、中温化混合物を使用しても110℃以下の転圧温度箇所においては仕様書の下限

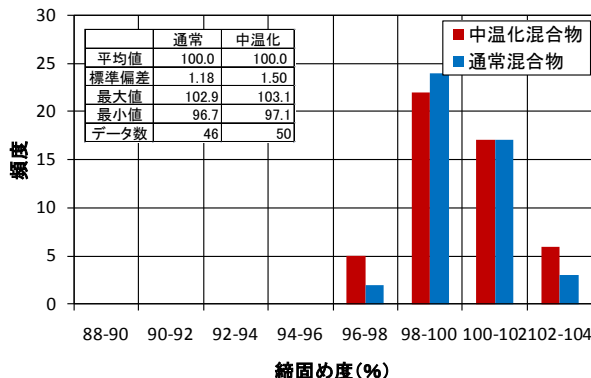


図-9 締め固め度 (ストアス・定点箇所・夏期)

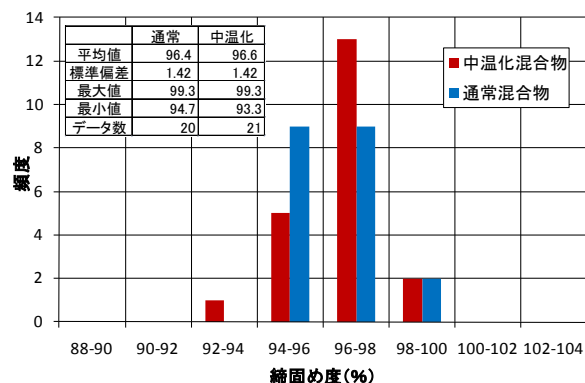


図-10 締め固め度 (改質I型・定点箇所・夏期)

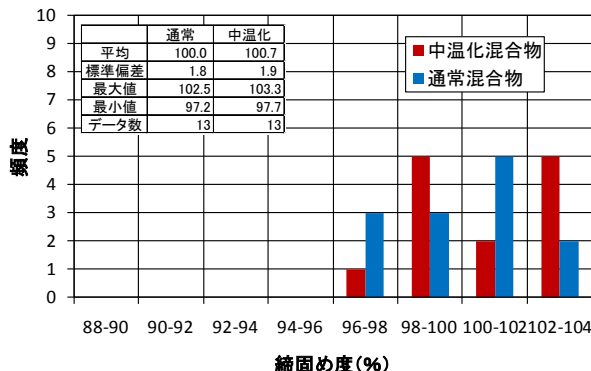


図-11 締め固め度 (排水性・定点箇所・夏期)

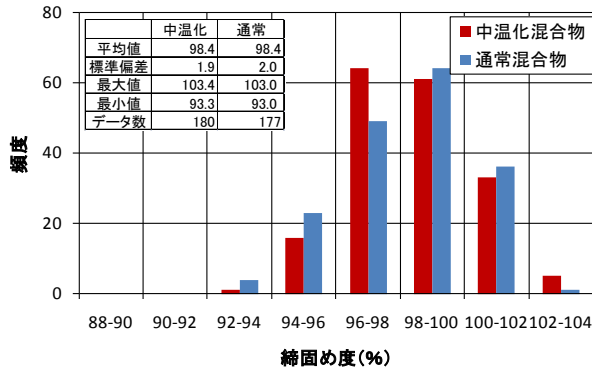


図-12 締め固め度 (ストアス・定点箇所・冬期)

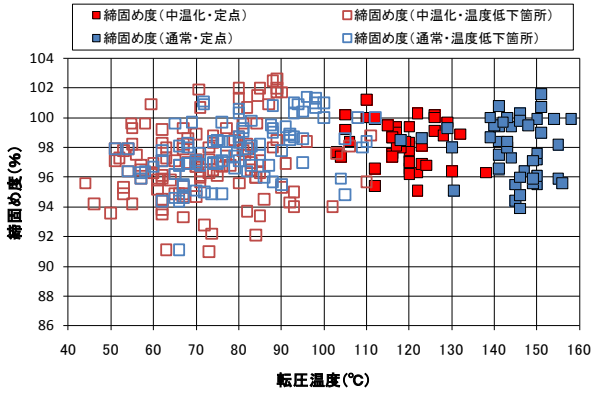


図-13 締固め度

(ストアス・定点箇所+温度低下箇所・冬期)

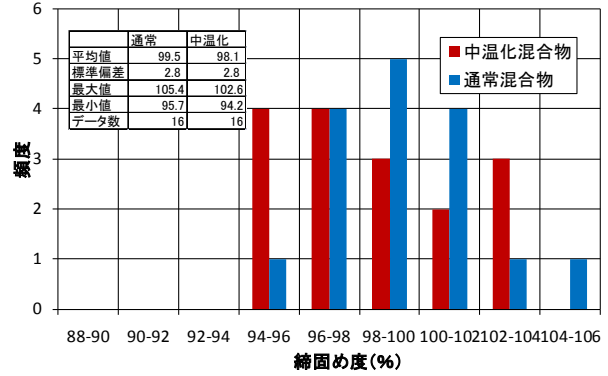


図-16 締固め度

(排水性・定点箇所・冬期)

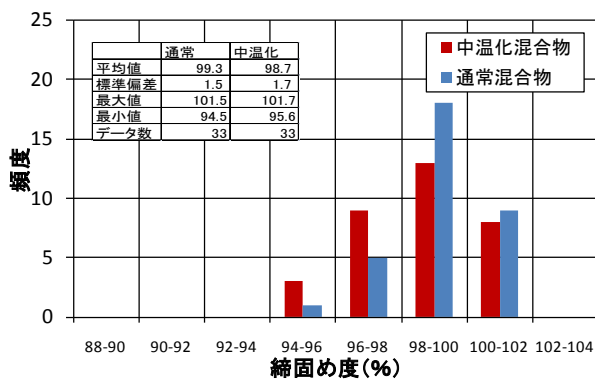


図-14 締固め度 (改質 I 型・定点箇所・冬期)

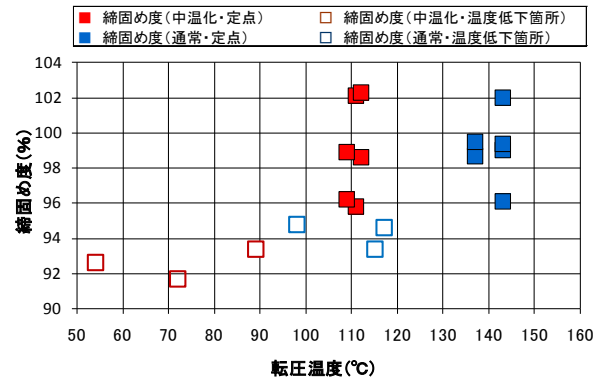


図-17 締固め度

(排水性・定点箇所+温度低下箇所・冬期)

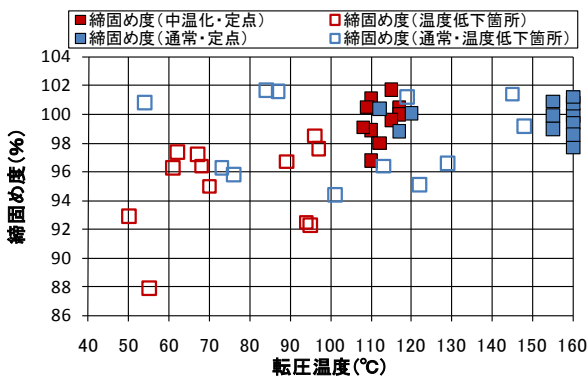


図-15 締固め度

(改質 I 型・定点箇所+温度低下箇所・冬期)

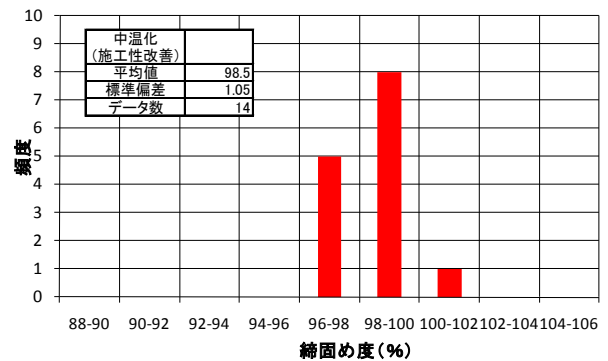


図-18 締固め度

(排水性・施工性改善・冬期)

限規格値94%以下のコアも見受けられる。

図-14に密粒度ギャップアスコン (改質 I 型) に中温化舗装技術を適用した締固め度の試験結果を示す。中温化混合物の敷均し温度は目標温度130°C以上を確保することができず (図-8参照)、中温化混合物の締固め度は通常混合物と比較し、やや低い結果となった。また、図-15に定点箇所および温度低下箇所から採取したコアの締固め度を示す。温度低下箇所から採取した

コアには下限規格値94%以下のコアも見受けられた。

図-16に排水性舗装に中温化技術を適用した締固め度の試験結果を示す。敷均し温度は目標温度130°C以上を確保することができず (図-8参照)、中温化混合物の締固め度は通常混合物と比較し低い結果となった。施工時には温度低下により固まって廃棄するAs混合物が通常混合物と比較し多く発生した。

図-17に定点箇所と温度低下箇所の締固め度を示す。中温化混合物の温度低下した箇所から採取したコアは

下限規格値94%を下回る試験結果となった。

図-18に排水性舗装の混合温度を30℃低減しない施工性改善を目的に実施した中温化混合物の締固め度を示す。出荷温度が高いため敷均し温度は130℃以上を確保し(図-8参照)、締固め度のバラツキも少なく良好な品質が得られた。

2.3.4 中温化混合物のCO₂削減効果

中温化混合物のCO₂削減効果については、骨材加熱時に使用するドライヤーのA重油使用量を流量計で計測し、A重油のCO₂原単位を乗じてCO₂排出量を算出し比較した。図-19に夏期施工におけるCO₂削減効果を示す。夏期施工では、中温化混合物の温度低減幅24～30℃程度の条件において、16～19%程度のCO₂削減効果が確認された。日本道路建設業界協会で示している15%の削減効果と比較し、同程度以上のCO₂削減効果が確認された。

図-20に冬期施工におけるCO₂削減効果を示す。中温化混合物の温度低減幅25～36℃程度の条件において、11～22%程度のCO₂削減効果が確認された。温度低減幅25～30℃程度の条件であれば、11～16%程度のCO₂削減効果があり、概ね10%以上のCO₂削減効果が期待できる結果となった。

2.4 まとめ

今回報告した中温化混合物の室内試験や試験施工で明らかになった内容を以下に示す。

(締固め度に関する事項)

- 1) ストレートアスファルトを使用した中温化混合物の最適締固め温度は110℃程度以上と考えられる。
- 2) ポリマー改質アスファルトを使用した中温化混合物の最適締固め温度は130℃程度以上と考えられる。
- 3) 夏期施工において30℃程度温度低減したストレートアスファルトを使用した中温化混合物の締固め度は通常混合物と比較し、同程度の締固め度を得ることが可能である。
- 4) 夏期施工において30℃程度温度低減したポリマー改質アスファルトを使用した中温化混合物の締固め度は通常混合物と比較し、同程度の締固め度を得ることが可能である。
- 5) 冬期施工において30℃程度温度低減したストレートアスファルトを使用した中温化混合物の締固

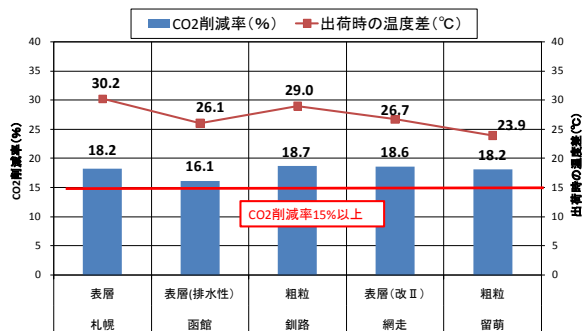


図-19 CO₂削減効果 (夏期)

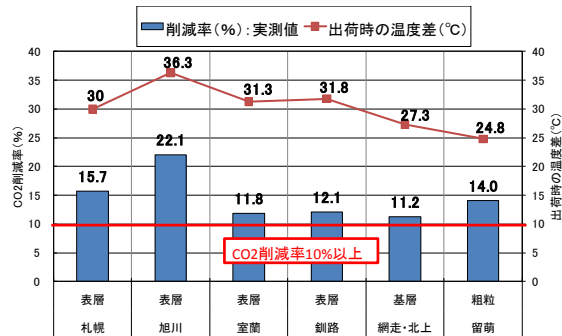


図-20 CO₂削減効果 (冬期)

め度は通常混合物と比較し、同程度の締固め度を得ることが可能である。ただし、冬期施工では敷均し時に発生する温度ムラは、夏期施工と比較し多く見られ、温度低下箇所は中温化混合物を使用しても仕様書の下限規格値94%を満足しない箇所が発生した。

- 6) 冬期施工において30℃程度温度低減したポリマー改質アスファルトを使用した中温化混合物の締固め度は、通常混合物と比較し低下する傾向が見られる。冬期施工では敷均し時に温度ムラの発生が夏期施工と比較し多く見られ、更に改質アスファルトは温度低下の影響を受けやすいため、温度低下箇所では中温化混合物を使用しても仕様書の下限規格値94%を満足しない箇所が発生した。また、排水性舗装の試験施工箇所では、通常混合物と比較し温度低下の影響より発生した破棄するAs混合物が多く見られた。
- 7) 施工性改善を目的に施工した温度低減しない排水性舗装の中温化混合物の締固め度は、品質のバラツキも少なく良好な結果を得た。

(CO₂削減効果に関する事項)

- 8) 中温化混合物のCO₂削減効果は、夏期施工で15%以上、冬期施工で10%以上の効果が確認された。

3. 積雪寒冷地の舗装リサイクル技術の開発

3.1 焼却灰を原料とした再生骨材の適用性

日本国内における石炭灰は主に電気事業や製紙会社などの一般産業により発生され、平成21年度の石炭灰発生量は全体で1,095万tであり、前年度に対して134万t（10.9%）減少している。このうち、電気事業は前年度に対し83万t（9.3%）の減少、一般産業は49万t（14.6%）減少している。また、石炭灰の利用先としては、セメント原料、コンクリート混和剤、地盤改良材などの使用用途があり、平成21年度の有効利用率は電気事業97%、一般産業で99%、全体で97%となっているが、有効利用されず埋立処分される物もあるため、最終処分場の延命化を図る目的からもさらなる有効な利用方法の検討が必要とされている。

A製紙会社ではバイオマスボイラーを使用しており、その燃料には木屑、石炭、廃タイヤ、ペーパースラッジ等を使用している。平成20年頃からの稼働となっているが、稼働に伴い発生する焼却灰は年間3万t程度あり、焼却灰を主原料として固化した骨材（以下：再生骨材）を製造している。再生骨材の製造方法を図-21に示す。製造工程は、バイオマスボイラーより発生したフライアッシュ（写真-1）やボトムアッシュ（写真-2）などの焼却灰とセメント、切込砂利、水を一定の割合で混練機により混合し、振動加圧成型機により成型したものを乾燥養生し、破碎することで再生骨材を製造する。この再生骨材は年間5万t程度製造しており、土木資材や埋戻し材として活用されている。

リサイクル材料の有効利用方法のひとつに、舗装構造における路盤材料や凍上抑制層材料としての適用があるが、北海道では、一般的に下層路盤材料として切込砕石、切込砂利およびコンクリート再生骨材が用いられている。下層路盤は車輛の荷重を分散する役割を持つ重要な層であり、用いられる材料には非凍上性や骨材の強度等の品質が求められる。また、凍上抑制層は舗装体の凍上対策として必要な層であり、北海道開発局では20年設計の場合、理論最大凍結深さの70%の深さまで置換えが必要であり、用いられる材料には砂、火山灰、粗粒材などで、非凍上性および規定の粒度範囲を満足した材料を用いなければならない。

リサイクル技術の評価や利用の促進のため、再生骨材を路盤材料や凍上抑制層に適用した場合の影響について調査検討を行った。



写真-1 焼却灰（フライアッシュ）



写真-2 焼却灰（ボトムアッシュ）

表-5 材料試験項目

試験名	試験方法	材料名または試験施工箇所の試験数量			試験目的
		再生骨材 40mm級	再生骨材 80mm級	切込砂利 80mm級	
粗骨材の比重および吸水率試験	JIS A 1110 準拠		○	○	材料の基本性状の把握
ロサンゼルス試験機による粗骨材のすり減り試験	JIS A 1121 準拠		○	○	施工時の細粒化の把握
岩のスレーキング試験	JHS 110 1992準拠		○		骨材の風化に対する抵抗性の把握
凍上試験	JHS 112 1992準拠		○		凍上性の把握
凍結融解後の細粒化材による凍上試験	JHS 112 1992準拠		○		凍上性の把握
(コンクリートの)凍結融解試験	JIS A 1148 準拠		○		凍結融解に対する抵抗性の把握
CBR試験	JIS A 1211 1998準拠		○		路床の支持力の把握
修正CBR試験	JIS A 1211 1998準拠	○	○	○	骨材の強度の把握
凍結融解後のCBR試験	JHS 110 1992準拠		○		凍結融解後の支持力の把握および凍上性の判定
土粒子の密度試験	JIS A 1202 準拠		○		材料の基本性状の把握
液性・塑性限界試験	JIS A 1205 準拠		○		材料の基本性状の把握
粒度試験	JIS A 1204 準拠				材料の基本性状の把握
突圍め試験	JIS A 1210 準拠	○	○		最適含水比の把握
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102 準拠	○	○	○	材料の基本性状の把握
溶出試験	六価クロム化合物		○		安全性の確認

3.2 研究方法

積雪寒冷地において再生骨材を路盤材料や凍上抑制層材料への適用性についての検討を行うため、凍上試験や凍結融解後の CBR 試験等を行い、非凍上性や凍結融解後の支持力低下の度合いを確認した。試験方法は骨材の材料試験（表-5）および現場試験を行った。

現場試験として試験施工ヤードを設け、舗装構造における下層路盤や凍上抑制層に再生骨材を適用し、舗装体に対する影響について確認した。また、他産業廃棄物のリサイクル材料を使用するため、再生骨材に対して環境安全性に関する溶出試験についても行った。

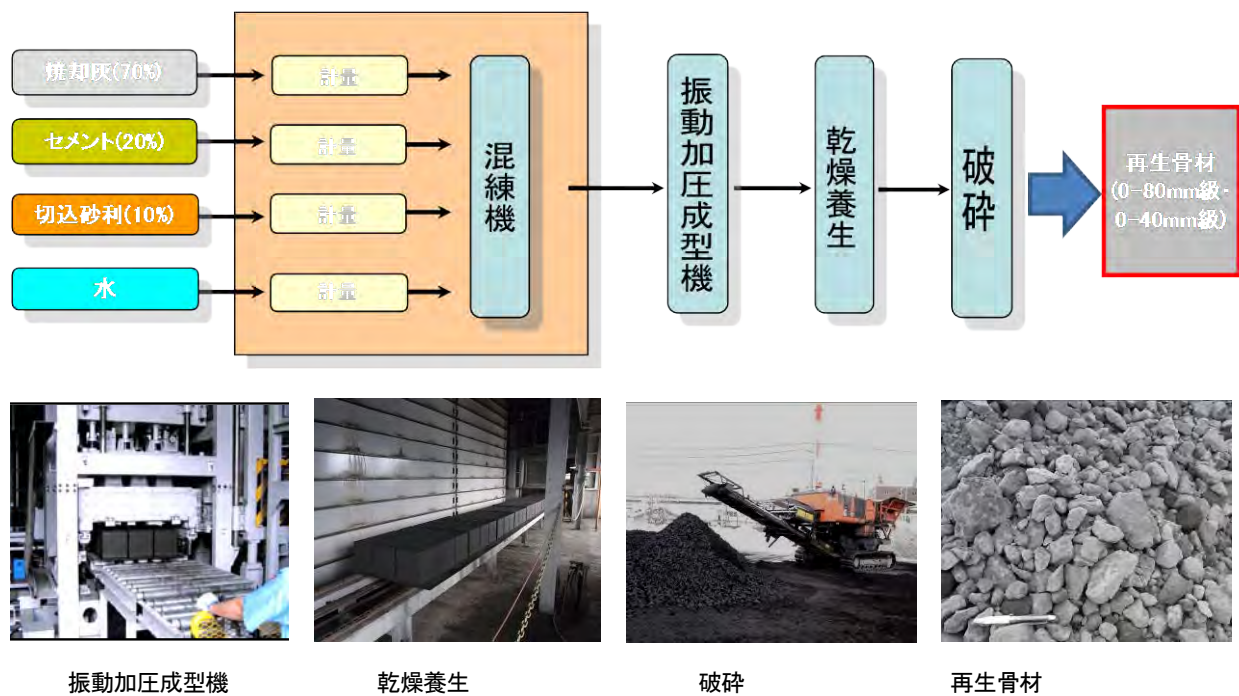


図-21 再生骨材の製造工程

3.3 研究結果

3.3.1 再生骨材の材料試験結果

材料の性状を把握するため、再生骨材 80 mm級、再生骨材 40mm 級および切込砂利 80mm 級を用い、物性値を比較した。試験結果を表-7 および以下に示す。

(1) 比重および吸水率試験

吸水率は、再生骨材 39.4%、切込砂利 2.2%を示し、再生骨材の吸水率はかなり高い材料であることが分かった。表乾比重については再生骨材 1.788、切込砂利は 2.657 となり、再生骨材は切込砂利の 70%程度であり、軽量の骨材であることが確認された。

表-6 材料試験結果

試験項目	単位	再生骨材	切込砂利	規格値	規格値
		80mm級	80mm級	(凍上抑制層)	(路盤材)
比重・吸水率試験	見掛	2.595	2.765	-	-
	表乾	1.788	2.657	-	-
	力サ	1.282	2.595	-	-
	吸水率	39.42	2.15	-	-
ロサンゼルス試験	すり減り量 (%)	57.8	23.6	-	45%以下
スレーキング試験	スレーキング率 (%)	0.5	-	-	-
CBR試験	C B R (%)	89.9	-	-	-
修正 CBR試験	2.5mm	74.5	84.9	-	30%以上
	5.0mm	85.0	-	-	-
土粒子の密度試験	(g/cm ³)	2.69	-	-	-
	液性限界	wL (%)	NP	-	-
液性・塑性限界試験	塑性限界	wP (%)	NP	-	-
	塑性指数	Ip	NP	-	-
突き固め試験	最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.192	2.048	-	-
	最適含水比 (%)	40.0	6.5	-	-
75 μmフルイ通過量	(%)	7.4	1.3	砂利: 9%以下 砕石: 15%以下	砂利: 9%以下 砕石: 15%以下
安定性試験損失量	(%)	56.2	-	-	20%以下

表-7 凍上試験結果

(2) ロサンゼルス試験

すり減り減量の値は、再生骨材 57.8%、切込砂利 23.6%を示し、路盤材としての規格値である 45% 以下の値からは外れており、再生骨材は転圧時に砕けやすい材料であると評価できる。ただし、凍上抑制層材料としての規格値は、「北海道開発局 道路・河川工事仕様書」では設定されていない。

(3) スレーキング試験

スレーキング試験は風化に対する評価を行う試験である。NEXCO では上部路床に使用する場合は、次のような設計基準を定めている。「スレーキング率が 50%以下のものを使用する。」あるいは「スレーキング

試験項目	再生骨材80mm級		切込砂利80mm級	
	施工前	凍結融解100サイクル	施工前	凍結融解100サイクル
凍上試験	凍上率 (%)	0.88	1.52	1.36
	凍上様式	1	1	1
	凍上性の判定	合格	合格	合格
	CBR保存率 (%)	90.6	-	-

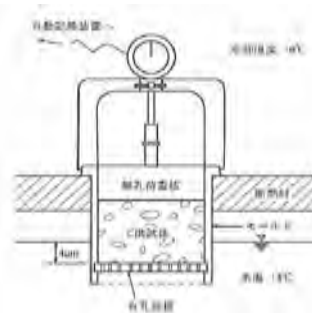


図-22 凍上試験機

率が約30%以上の材料を路体に使用する場合には、施工後の圧力沈下に留意する必要があるとしている。」とされているが、再生骨材のスレーキング率は0.5%の値を示し、スレーキングは発生しにくい材料であると評価できる。

(4) 室内 CBR 試験

再生骨材の室内 CBR 試験の値は、89.9%であり、高い支持力が期待できる。また、凍結融解後の CBR 保存率は、90.6%の値を示しており（表-7）、一般的な粗粒材の保存率とされている70%よりも高く、凍結融解後の支持力は一般的な粗粒材と同程度以上と考えられる。

(5) 修正 CBR 試験

路盤材料に使用する場合の修正 CBR の規格値は30%以上であるが、今回の試験結果では、再生骨材80mm 級は85%の値を示していた。一般的な切込砕石の修正 CBR は70%以上であり、同程度は確保している。

(6) 土粒子の密度試験

土粒子の密度は、土粒子と有機物からなる土の固体部分の単位体積当たりの平均質量である。再生骨材の土粒子の密度は2.69であり、現地の路床材料の粘性土2.562、礫質土2.669と比較しても大きな差は見られなかった。

(7) 液性・塑性限界試験

シルト粒子や粘度分を多く含む細粒土は、含水比の多少に応じて、液体から固体まで状態が変化し、その量によって状態は異なるが、再生骨材は含水比が多い状態でも、固体から塑性体・液体に変化せず、NP（non-plastic）と判断された。なお、「舗装再生便覧」では下層路盤材に再生材を利用する場合は、路床土の混入を防止するため、規格値であるPI（塑性指数）を6以下と定めている。

(8) 凍上試験

凍上試験は NEXCO で開発した凍上試験機を用いて行った。試験結果を表-8、試験機の概要を図-22 に示す。再生骨材の試験は施工前の材料と凍結融解100サイクル後の試料を用い実施した。両方の材料ともに

表-8 溶出試験結果

分析項目	【単位】	基準値	分析(測定)結果 (再生骨材)
カドミウム	【mg/L】	0.01以下	0.0005未満
六価クロム	【mg/L】	0.05以下	0.006
総水銀	【mg/L】	0.0005以下	0.00005
セレン	【mg/L】	0.01以下	0.004
鉛	【mg/L】	0.01以下	0.001未満
砒素	【mg/L】	0.01以下	0.003
ふっ素	【mg/L】	0.8以下	0.36
ほう素	【mg/L】	1以下	0.2

凍結様式は1となり、非凍上性の材料と評価できた。

また、再生骨材は凍結融解100サイクル後の試料を用いて凍上試験を行った結果、骨材は凍結融解により細粒化したが、非凍上性の材料と評価できた。

(9) 75μmふるい通過量

5mmふるい通過量のうち、75μmふるい通過量の比率を北海道開発局の仕様書では規格値として設けられている。この試験の目的は、使用する路盤材料や凍上抑制層材料が非凍上性の材料であることを確認する目的としており、再生骨材はこの規格値を満足した。

(10) 溶出試験

再生骨材に対して環境省に示されている第二種特定有害物質の8項目の溶出試験を実施し、環境に悪影響を及ぼす物質の溶出性をカドミウム等の項目について分析を行った。試験結果を表-8に示す。今回の分析結果において、環境上問題となる計量値は測定されなかった。

(11) 凍結融解後の細粒化による粒度試験

凍結融解による再生骨材への影響を確認するため、凍結融解試験装置を用い、凍結融解後に粒度試験を実施した。粒度曲線図を図-23、図-24に、凍結融解後の粒度試験結果を表-9に示す。試験条件は-18℃～+5℃のサイクルで10、20、50、100回実施後、粒度試験を行い、再生骨材と切込砂利の比較をした。凍結融解作用を受けた再生骨材の粒度は細粒化する試験結果となった。ただし、凍上に影響する75μmふるい通過量の増加量は切込砂利と比較しても同程度の値だった。

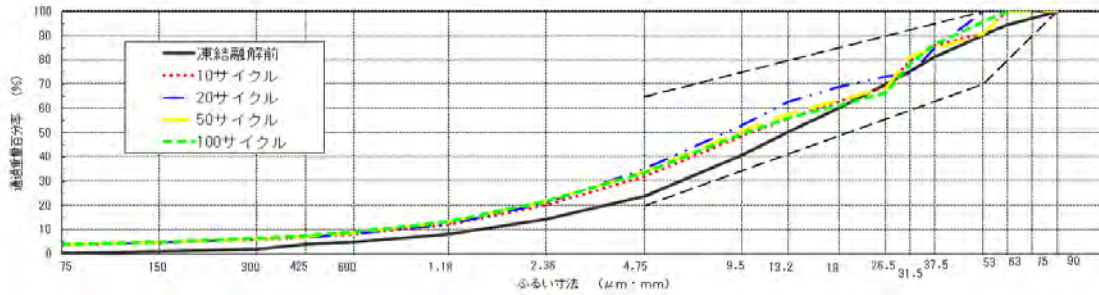


図-23 凍結融解による粒度曲線図 (切込砂利)

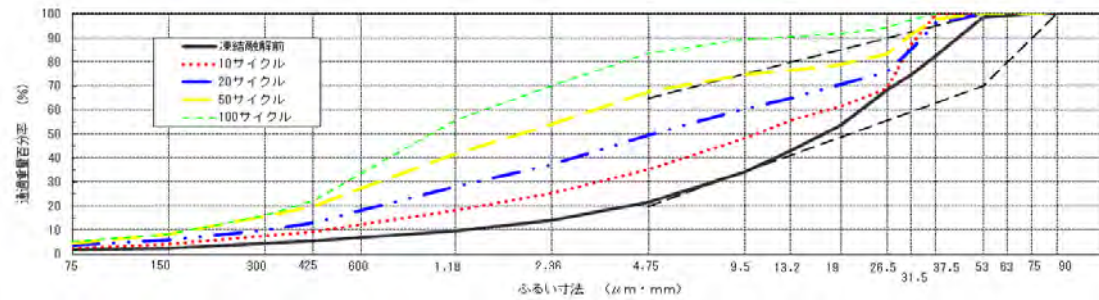


図-24 凍結融解による粒度曲線図 (再生骨材)

表-9 凍結融解後の粒度試験

粒度試験 (%)	通過質量百分率 (%)	再生骨材80mm級					切込砂利80mm級				
		凍結融解サイクル					凍結融解サイクル				
		施工前	10	20	50	100	施工前	10	20	50	100
90 mm						100.0					
75	100.0					97.0					
63	99.5					94.6	100.0	100.0	100.0	100.0	
53	98.7	100.0	100.0	100.0		90.3	89.4	90.9	91.0	95.7	
37.5	82.7	94.7	96.4	98.2	100.0	81.3	85.9	85.0	84.5	86.3	
31.5	75.0	87.6	85.5	91.6	97.7	75.4	79.4	74.1	81.6	78.4	
26.5	68.5	69.1	75.9	83.3	94.4	70.1	68.7	73.2	68.5	66.6	
19	53.7	61.7	70.6	78.9	92.1	60.4	62.8	69.0	63.7	61.5	
13.2	43.2	55.9	65.1	76.6	90.8	50.3	55.9	62.7	57.7	56.2	
9.5	34.3	48.1	60.5	74.7	89.6	40.9	48.7	53.0	51.0	49.5	
4.75	21.6	35.3	49.7	67.7	83.9	23.8	31.9	35.1	34.0	33.8	
2.36	14.1	25.4	37.4	54.1	70.0	14.5	20.2	21.2	21.9	21.9	
1.18	9.6	18.2	28.1	41.6	55.7	8.3	12.1	12.2	13.3	13.6	
600 μm	6.9	12.2	18.2	27.4	33.7	5.0	8.1	8.3	8.9	9.1	
425	5.5	9.2	13.1	20.0	22.4	3.9	6.8	6.9	7.3	7.6	
300	4.6	7.7	10.1	15.7	16.0	2.1	6.0	6.1	6.4	6.7	
150	2.6	4.1	5.9	8.4	8.4	1.0	4.7	4.7	4.9	5.1	
75	1.6	2.6	3.7	4.5	5.1	0.3	3.7	3.7	4.0	4.1	

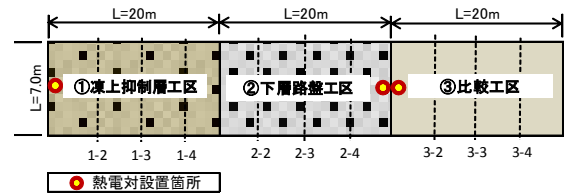


図-25 試験舗装平面図

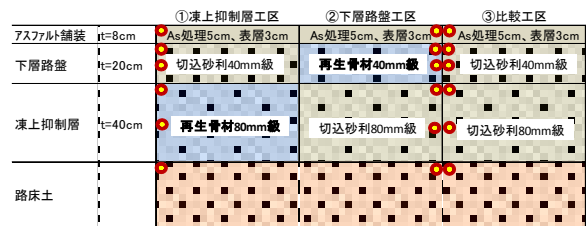


図-26 試験舗装定規図

表-10 現場試験項目

調査項目	試験数量	試験目的
凍上量調査	3箇所×3測線×3工区+3箇所1×測線×1工区=30箇所(1回当たり)(冬期)	凍上量の影響把握
舗装体の温度測定	通年	凍結融解回数の把握および舗装体温度の経時変化
現場密度試験	施工後	密度の確認(砂置換)
作業性	施工後	作業性の確認
現場CBR試験	1箇所×3工区 (1年経過後)	舗装体の支持力を把握
骨材のふるい分け試験	1箇所×3工区 (1年経過後)	骨材粒度を確認

(12) 安定性試験

安定性試験は骨材の凍結融解への耐久性を評価する試験である。今回の材料では行っていないが、同じ配合の再生骨材を使用した際に行った試験結果によると、安定性試験損失量は 56.2% となり、路盤材として使用する場合の規格値の 20% 以下は満足出来ない結果となった。この原因は再生骨材の吸水率が高いことが要因となっていると考えられる。ただし、実際の凍結融解試験では細粒化しても骨材の支持力が低下しないことや非凍上性が確認されている。

3.3.2 現場試験結果

再生骨材の凍上抑制層および下層路盤への適用性を確認するため、A 製紙会社の構内において、3 つの

工区を造成し、凍上試験や現場 CBR 試験等を行った。なお、舗装構成は旭川市の生活道路に準じた。試験施工箇所の平面図を図-25、定規図を図-26、試験項目を表-10、試験結果を以下に示す。

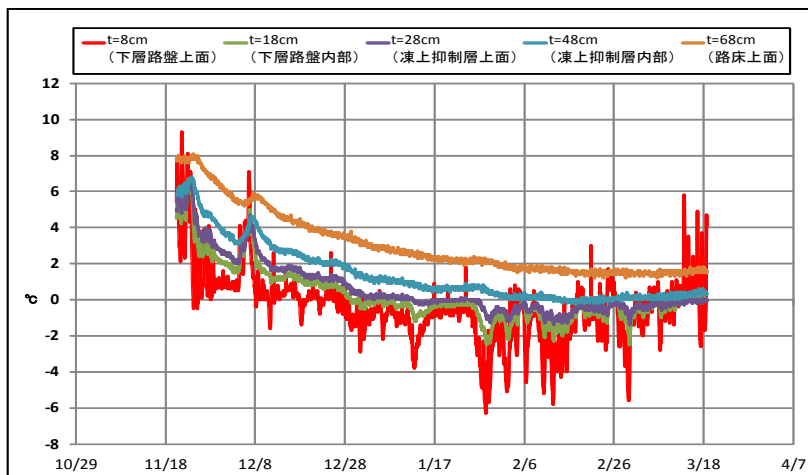


図-27 舗装体の温度計測データ (凍上抑制層工区)

表-11 凍上量の調査結果

測定日	工区名	測線	凍上量 (mm)					平均値
2/28	凍上抑制層工区	1-2	2	1	4	5	3	
		1-3	1	0	6	9	4	
		1-4	4	1	6	5	4	
	下層路盤工区	2-2	1	1	2	0	1	
		2-3	0	3	2	4	2	
		2-4	0	0	1	2	1	
	比較工区	3-2	6	3	3	3	4	
		3-3	3	2	2	3	3	
		3-4	7	2	1	3	3	

表-12 現場密度試験結果 (施工直後)

①凍上抑制層工区 (再生骨材80mm級)				規格
1	2	3	平均	
87.1	90.9	90.1	89.4	90%以上
②下層路盤工区 (再生骨材40mm級)				
1	2	3	平均	
97.0	98.2	95.9	97.0	93%以上、X3:97%以上
③比較工区 (切込砂利40mm級) 下層路盤				
1	2	3	平均	
96.7	98.2	96.7	97.2	

(1) 凍上量の調査

凍上の影響はレベル (水準儀) を用いて路面高さを計測することにより調査をした。舗装体の温度計測データを図-27、調査結果の一部を表-11 に示す。得られた温度データから舗装体の凍結深さは 50cm 程度と推定され、凍上抑制層内部まで達していると思われる。各工区毎の凍上量は凍上抑制層工区 0~9mm、下層路盤工区 0~4mm、比較工区 1~7mm 程度であり、大きな差は見られなかった。

(2) 現場密度試験

現場の締固め度の試験結果を表-12、試験状況を写真-3 に示す。下層路盤に使用した再生骨材は仕様書の規格値を満足していたが、凍上抑制層に使用した材料は規格値の下限値程度の値となった。

(3) 施工性

再生骨材の施工性について確認した。通常の骨材と同様の方法で施工し、施工性について問題はない。ただし、凍上抑制層については、締固め度の規格値を外れる箇所も見られることから、転圧方法や転圧回数を検討する必要があると考えられる。

表-13 現場 CBR 試験結果

工区名	単位: %
①凍上抑制層工区 (再生骨材80mm級)	73.4
②下層路盤工区 (再生骨材40mm級)	126.2
③比較工区 (切込砂利80mm級) 凍上抑制層	109.9



写真-3 砂置換法 (現場密度試験)



写真-4 現場 CBR 試験

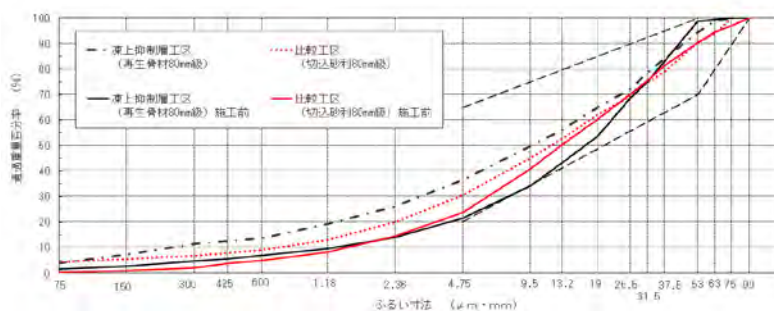


図-28 骨材粒度曲線図 (1年経過後)

表-14 粒度試験 (1年経過後)

通過質量百分率 (%)	凍上抑制層工区 (再生骨材80mm級)	比較工区 (切込砕石80mm級)
	80 mm	100.0
75	100.0	100.0
63	98.8	93.7
53	94.5	90.4
37.5	83.9	78.9
31.5	78.4	74.7
26.5	72.3	69.4
19	65.1	62.3
13.2	56.3	52.8
9.5	49.8	45.1
4.75	36.6	30.6
2.36	26.2	19.9
1.18	19.3	12.9
600 μm	13.6	9.1
425	12.5	7.9
300	11.4	6.9
150	7.2	5.4
75	3.8	4.4

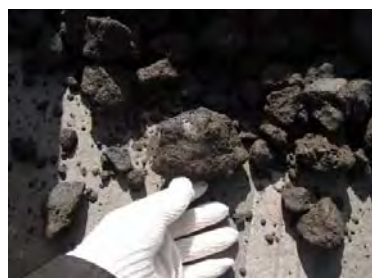


写真-5 再生骨材 (1年経過後)

(4) 現場 CBR 試験 (1年経過後)

施工後、約1年経過した後に開削し、各工区において現場 CBR 試験を行った。現場 CBR 試験の試験結果を表-13、試験状況を写真-4 に示す。凍上抑制層工区 73.4%、下層路盤工区 126.2%、比較工区 109.9%を示し、各工区とも高い支持力を示していた。

(5) 75 μm ふるい通過量 (1年経過後)

開削後に採取した骨材の粒度曲線図を図-28、骨材の粒度試験結果を表-14 に示す。1年経過後の再生骨材の粒度は施工前よりも細粒化する傾向が見られた。また、凍結融解作用を受けた再生骨材を手にとったところ、凍結融解を受けて脆くなっている材料も見られた(写真-5)。しかし、凍上に影響を与える 75 μm ふるい通過量の増加はあまり見られなかった。

3.4 まとめ

今回行った試験結果から焼却灰を主原料とした再生骨材を舗装用材料として使用した場合の適用性について以下に示す。

(1) 凍上抑制層材料としての適用性

1) 凍上試験の結果から、非凍上性の材料であることが確認された。凍結融解により再生骨材は細粒化

するが、75 μm ふるい通過量の凍上抑制層の規格は満足することも確認されている。また、凍結融解後の CBR 試験の保存率は 90%程度を示し、凍結融解後の支持力低下は粗粒材と同等程度以上であることが確認された。

- 現場試験においても、1年経過後の開削後の骨材粒度については凍上に影響を与える 75 μm ふるい通過量の増加は少なく、支持力も高い値を示した。
- 締固め度についてやや不足していた箇所もあったが、転圧方法を考慮することにより品質確保は可能と考えられる。

(2) 路盤材料としての適用性

- 修正 CBR の規格値 30%以上を満足し、一般的な切込砕石と同等程度の支持力を有することが確認された。
- 凍上に影響を与える 75 μm ふるい通過量の規格値は満足している。安定性試験では規格値を外れているが、実際の凍結融解試験では細粒化しても骨材の支持力が低下しないことや非凍上性が確認された。
- すり減り減量は規格値を外れ、転圧機械により細粒化する材料であることが確認された。
- 現地試験を行った結果、締固め度および支持力の値には問題は見られなかった。

RESEARCH ON PAVEMENT TECHNOLOGY REALIZING A LOW CARBON SOCIETY AND EVALUATION METHOD (3)

Budgeted : Grants for operating expenses general account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Road Maintenance Research Team

Author : KUMAGAI Masayuki

MARUYAMA Kimio

ABE Ryuji

MITAMURA Koji

Abstract : The purposes of this study are to develop pavement recycling technology in heavy snowfall and cold regions and developing low carbon pavement technology for reducing CO₂ in pavement construction in heavy snowfall and cold regions. During this year, test pavements were developed using warm mix pavement technology, and CO₂ reduction effect quality data and quality of warm mix in heavy snow and cold regions were gathered. Additionally, test pavements were developed using incinerated ash for an antifrost layer in order to recycle other industrial wastes and the quality of recycled aggregate was confirmed.

Key words : low-carbon society, warm mix pavement ,recycle, carbon reduction, other industrial wastes