

# 焼却灰を利用した再生骨材の凍上抑制層への適用性に関する検討

(独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○大山 健太郎  
熊谷 政行  
安倍 隆二

本研究では他産業廃棄物の利用促進を目的として、リサイクル資材の凍上抑制層への適用方法について検討した。本報告では、木屑等を燃料としたバイオマスボイラーから発生した焼却灰を利用した再生骨材を凍上抑制層として適用するため、室内試験、試験施工および追跡調査を実施して検討した結果を報告するものである。

キーワード：リサイクル、焼却灰、再生骨材、凍上抑制層

## 1.はじめに

他産業再生資材は、建設業以外から発生した材料であり、リサイクル推進の観点から積極的に活用していくことが望ましい。他産業再生資材を凍上抑制層材料として、積雪寒冷地で活用するためには、凍上、凍結融解の耐久性、融解期の支持力、環境負荷、および繰返し再生利用の可否等を検討する必要がある。

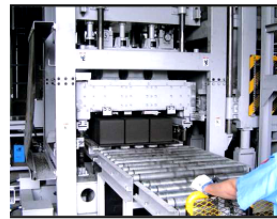
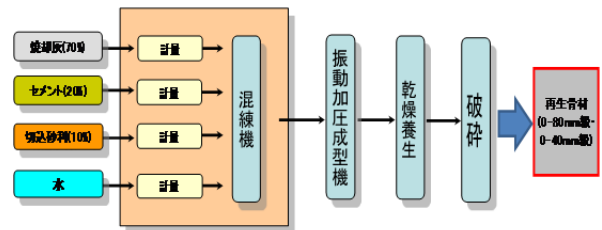
本報告では、製紙工場から発生する焼却灰を主材料とした再生骨材を凍上抑制層として適用するために検討した結果を報告するものである。

## 2. 焼却灰を原料とした再生骨材の適用性

日本製紙株式会社 北海道工場 旭川事業所（以下、日本製紙 旭川事業所）ではバイオマスボイラーを使用しており、バイオマスボイラーの燃料には木屑、石炭、廃タイヤ等を使用し、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-1に示す。

再生骨材の製造工程は、バイオマスボイラーから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、切込砕石、および水を一定の割合で混練機で混合し、振動加圧成型機に立方体状に成型し、乾燥養生を行い、破砕機により破砕することで再生骨材を製造する。

リサイクル材料の舗装材料への有効利用方法に、舗装体の下層路盤材料や凍上抑制層材料としての適用が考えられるが、本報告では、凍上抑制層の適用性についての検討結果を主に報告する。なお、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年設計を適用する場合、理論最大凍結深さの70%の深さまで非凍上性材料で置換えを行い、使用する材料は非凍上



振動加圧成型機



乾燥養生



破砕



再生骨材

図-1 再生骨材の製造工程



写真-1 フライアッシュ



写真-2 ボトムアッシュ

であり、かつ規定の粒度範囲を満足した材料を用いる必要がある。

表-1 再生骨材の配合及び室内試験結果

試験項目		単位	H21.7.17	H22.4.16	H23.4.9	H23.7.1	H24.5.2	H24.9.13	H25.6.1	H25.10.15	—	—
灰処理配合 (パッチあたり仕込量)	フライアッシュ	kg	756	843	853	853	853	838	838	838	—	—
	ボトムアッシュ	kg	254	203	263	263	263	263	263	263	—	—
	切込砕石(5-13mm)	kg	0	0	145	145	150	150	150	150	—	—
	ピリ	kg	360	290	0	0	0	0	0	0	—	—
	セメント(高炉B)	kg	310	310	310	340	340	360	360	360	—	—
	清水	kg	500	500	500	500	500	500	500	500	—	—
灰(FA+BA)に対するセメント比率		%	31	30	28	30	30	33	33	33	—	—
特記事項			●灰処理対策 ①灰(フライアッシュ) (756→843)	●混練攪拌対策 ①ピリ切込砕石	●すりへり対策 ①セメントアップ (310→340)	●すりへり対策 ①セメントアップ (340→360) ②灰(フライアッシュ) (853→838)					—	—
凍上抑制層への 適用調査地区	場所		旭川市東鷹栖	構内試験道路		旭川市春光台	芦別市				—	—
	施工日		H21-8月	H22-10月		H23-11月	H24-9月				—	—
											骨材試験 規格値	
											凍上抑制層	路盤材
骨材試験	修正CBR	%	156.5	104.7	76.0	112.2	75.9	102.8	125.9	116.1	—	30%以上
	すりへり減量(粒径5~13)	%	43.6	32.7	47.6	42.9	44.7	39.5	41.4	45.7	—	45%以下
	安定性試験損失量	%	56.2	47.8	44.8	57.6	41.9	40.3	45.4	46.2	—	20%以下
	吸水率	%	32.41	28.77	43.24	31.33	40.41	38.49	40.26	44.23	—	—
	表面密度	g/cm <sup>3</sup>	1.77	1.80	1.64	1.79	1.67	1.72	1.68	1.68	—	—
	絶乾密度	g/cm <sup>3</sup>	1.34	1.40	1.14	1.36	1.19	1.24	1.20	1.16	—	—
凍上試験 (試験方法:φ8)	凍上率 判定:凍結様式1-1-1	%	12.3 (20%未満)	6.6 (合格)	9.4 (合格)		7.0 (合格)	3.4 (合格)	6.9 (合格)	3.2 (合格)	20%未満	20%未満

### 3. 検討方法

積雪寒冷地において再生骨材を凍上抑制層への適用についての検討を行うため、室内試験では、一般的な性状試験、凍上試験、凍結融解後のCBR、溶出試験等を行い、再生骨材の品質を確認した。

現地試験としては、日本製紙 旭川事業所に旭川市の生活道路の舗装に準じた試験施工ヤードを設け、下層路盤や凍上抑制層に再生骨材を用いた。更に、旭川市春光台、旭川市東鷹栖、および芦別市の市道の凍上抑制層に再生骨材を用いた試験ヤードを設けた。現地調査としては、融解期の支持力低下を把握するためにFWD調査や現場CBR試験を行った。また、凍上の影響を把握するため凍上量調査等を行い、積雪寒冷地における再生骨材の凍上抑制層への適用について検討を行った。

### 4. 材料試験結果

再生骨材の配合については、日本製紙 旭川事業所から日々発生する焼却灰の量を全量処理するため、フライアッシュおよびボトムアッシュの量が決定されている。

セメント量等の配合率の検討については、凍上抑制層以外の用途拡大を図るため、下層路盤材料への適用や別の用途である林道の敷砂利として利用できる様、すり減り減量を少なくする配合も検討した。また、再生骨材の品質の変動についても併せて確認した。表-1に検討した再生骨材の室内試験の配合および試験結果を示す。

#### (1) 修正CBR試験

平成21年7月から25年10月までの期間で、再生骨材の配合を調整した。セメント量は310kgから360kgに増加し、

使用する骨材もピリから切込砕石(5-13mm)に変更した。下層路盤材料に使用する場合は修正CBRの規格値は30%以上<sup>1)</sup>であり、配合が変更しても70%程度以上の値を示した。一般的な切込砕石の修正CBRは70%以上であり、同等以上の値を示した。現時点の配合であるセメント量360kgの修正CBRの値は100%程度以上の値を示している。

なお、「北海道開発局 道路・河川工事仕様書」(以下、仕様書)では、凍上抑制層材料の修正CBRの規格値は設けられていない。

#### (2) ロサンゼルス試験(すり減り減量)

すり減り減量の規格値は、転圧時に骨材が細粒化することを防止するために設けられている試験方法である。下層路盤材料には規格値を設けているが、凍上抑制層には設定されていない。

すり減り減量の仕様書の規格値は、45%以下に設定されており、すり減り減量の値は30~50%の範囲に推移している。セメント量や使用する骨材の影響は少なく、規格値である45%前後に推移しているため、規格値を外れる可能性が高い。

#### (3) 吸水率及び密度について

吸水率については、セメント量や使用骨材を変更しても30~40%を推移し、かなり高い数値を示した。焼却灰の影響により吸水性が高く、表乾密度は1.7前後を示し、通常骨材より1.0程度軽い材料である。

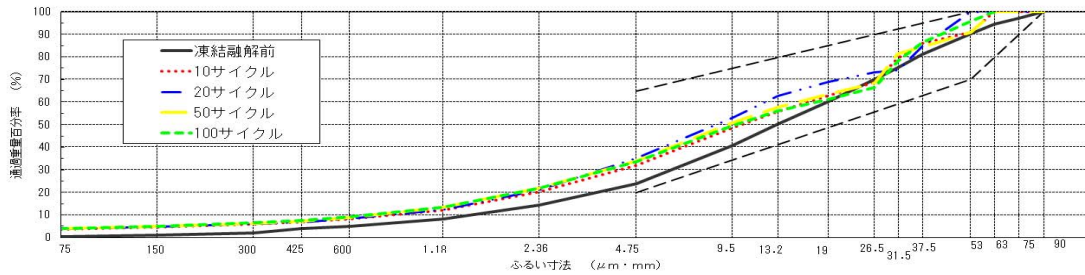


図-2 凍結融解による粒度曲線図（切込砂利）

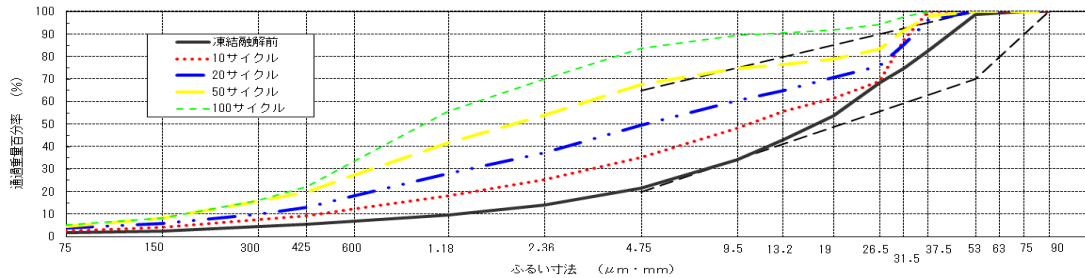


図-3 凍結融解による粒度曲線図（再生骨材）

表-2 凍上試験結果（NEXCOの試験方法）

		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	-	-	-

#### (4) 凍上試験

「社団法人 日本道路協会 排水工指針」の凍上試験方法による試験結果を表-1に示す。どの配合でも非凍上性を示した。

H22.4の再生骨材を用いた試験は、施工前、凍結融解100サイクル後の材料を用い、NEXCOの試験方法でも実施した（表-2）。両方の材料ともに凍結様式は「1」となり、非凍上性の材料と評価できた。凍結様式とは、供試体を凍上させたときの供試体の凍結状態を5段階で表している。ここでの「1」とはコンクリート状凍結を表しており、氷晶がまったく認められない状態をいう。

凍結融解100サイクル後の再生骨材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。非凍上性の材料と評価できた。

凍結融解後の支持力低下を把握するため、凍結融解後のCBR試験を実施した。凍結融解後のCBR保存率は90.6%を示し、一般的な粗粒材の保存率70%と比較しても同等程度以上の値を示した。

#### (5) 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-2、図-3に示す。試験条件は-18°C~+5°C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ふるい通過量は切込砂利と比較しても同程度の値だった。

#### (6) 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について分析を行った。試験結果を表-3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。またセメント量を増やした配合でも実施したが、土質基準値を越える数値は測定されなかった。

表-4に含有量試験結果を示す。再生骨材に含有する8項目の分析結果では、基準値以下の値を示し、基準値の1/10以下である。なお、「社団法人 日本道路協会 舗装再生便覧」では、有害物質の溶出量と含有量基準を満足することが望ましいとされている<sup>2)</sup>。

表-3 溶出試験

分析項目試料 (土壌環境試験)	単位	土壌	全試験回数(回) (24.9~H25.9)	分析結果 (測定最高値)
		基準値		
カドミウム	mg/L	0.01以下	13	0.001未満
鉛	mg/L	0.01以下	13	0.001未満
全シアン	mg/L	検出されないこと	13	不検出
六価クロム	mg/L	0.05以下	28	0.044
砒素	mg/L	0.01以下	13	0.001
総水銀	mg/L	0.0005以下	13	0.00016
アルキル水銀	mg/L	検出されないこと	13	不検出
セレン	mg/L	0.01以下	28	0.007
ほう素	mg/L	1以下	28	0.5
ふっ素	mg/L	0.8以下	28	0.62



表-4 含有量試験

分析項目試料 (含有量試験)	単位	含有試験 基準値	分析結果 (測定最高値)
かミウム	mg/Kg	150以下	15未満
鉛	mg/Kg	150以下	33
全シアン	mg/Kg	50以下	5未満
六価クロム	mg/Kg	250以下	25未満
砒素	mg/Kg	150以下	15未満
総水銀	mg/Kg	15以下	1.5未満
セレン	mg/Kg	150以下	15未満
ほう素	mg/Kg	4000以下	400未満
ふっ素	mg/Kg	4000以下	400未満

4. 現地調査結果

現地調査項目を表-5に示す。現地試験では、施工性や施工時の品質、凍上や凍結融解に対する影響、融解期の支持力低下、供用性状について調査を行った。試験施工箇所は、日本製紙構内、旭川市春光台、旭川市東鷹栖、芦別市の市道で調査を行った。試験箇所別の舗装構成を図-4~図-7に示す。

表-5 現地調査項目

調査項目	試験目的	試験対象工区			
		日本製紙	春光台	東鷹栖	芦別
現場密度試験	密度の確認(砂置換)	○	○	—	○
骨材のふるい分け試験	骨材粒度を確認	○	○	—	○
施工性	施工性の確認	○	—	—	—
舗装体の温度測定	凍結融解回数の把握	○	○	—	—
凍上量調査	凍上量の影響確認	○	○	—	—
現場CBR試験	舗装体の支持力を把握	○	○	—	—
FWD調査	たわみ量の測定	○	○	○	—
横断凹凸量調査	わだちぼれ量の測定	—	○	○	—

(1) 施工性および現場密度試験

再生骨材の施工性について日本製紙構内や芦別市において確認した。施工については通常の骨材と同様に実施したが、日本製紙構内の凍上抑制層工区、旭川市春光台で仕様書の規格値90%以上を満足できない結果となった(表-6)。

芦別市の試験施工箇所において、転圧回数を3通りのパターンで施工し、締固め度を比較した。転圧回数が2~4往復では、所定の締固め度が得られない結果であったが、6往復の転圧を行うことにより90%以上の締固め度が得ることができた。規格値を満足できなかった箇所は、転圧回数が不足していたと推察される。図-8に転圧回数と粒度分布の関係を示す。転圧回数が増加すると、骨材の細粒化がやや見られたが、凍上に影響を与える0.075μm以下のシルト分の増加は見られなかった。

再生骨材の最適含水比は40%程度であり、通常の骨材と比較し高いため、含水比の管理についても重要である。

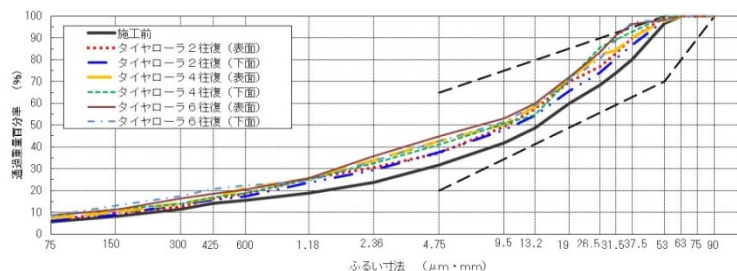


図-8 転圧回数と粒度分布の関係 (芦別市)

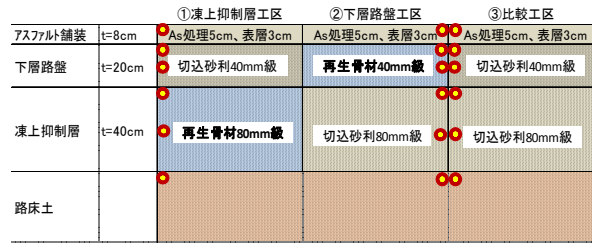


図-4 試験施工箇所 (日本製紙構内) 施工時期 H22. 10

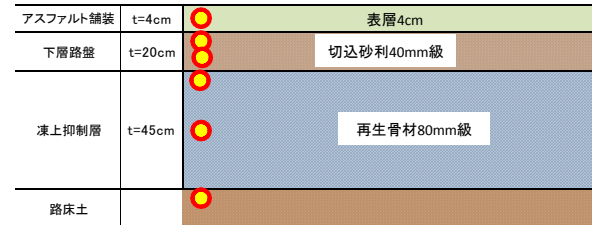


図-5 試験施工箇所 (旭川市春光台) 施工時期 H23. 11

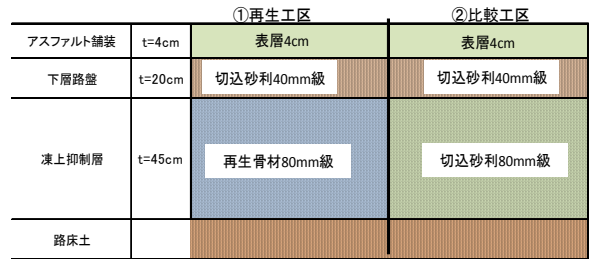


図-6 試験施工箇所 (旭川市東鷹栖) 施工時期 H21. 8

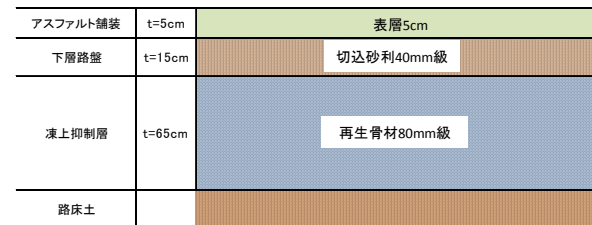


図-7 試験施工箇所 (芦別市) 施工時期 H24. 9

表-6 現場密度試験

場所・工区名		再生骨材工区 現場密度 (%)	比較工区 現場密度 (%)
日本製紙	凍上抑制層工区 (80mm級)	89.4%	97.2% (40mm級)
	下層路盤工区 (40mm級)	97.0%	
旭川市	春光台	86.7%	92.5%
芦別市	タイヤローラ(2往復工区)	84.1%	—
	タイヤローラ(4往復工区)	87.6%	
	タイヤローラ(6往復工区)	91.1%	

## (2) 凍上量および最大凍結深さの調査

凍上量の測定はレベル（水準器）を用い、路面高さを計測することにより凍上量を測定した。図-9に平成24年2月に測定した凍上量調査結果を示す。凍上量は3測線の計測を行い、平均値と最大値を示した。凍上量の平均値や最大値は比較工区と同等程度の値を示した。再生骨材や通常骨材は非凍上性の材料であるが、路床の凍上や粗粒材料自体もある程度は凍上するため、その影響が生じたと推察できる。図-10に最大凍結深さを示す。旭川市春光台は凍結深度計は設置していないため、埋設した熱電対の温度データを用い、最大凍結深さを推定した。再生骨材の路床部（h=69cm）に埋設した熱電対はマイナスの温度を計測したことから69cm以上は凍結し、路床土まで凍結したと考えられる。

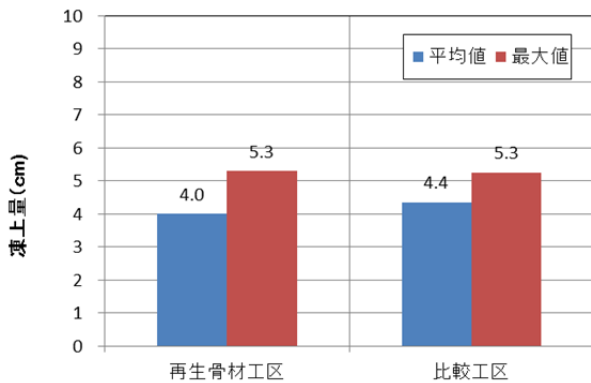


図-9 凍上量調査 (旭川市春光台)

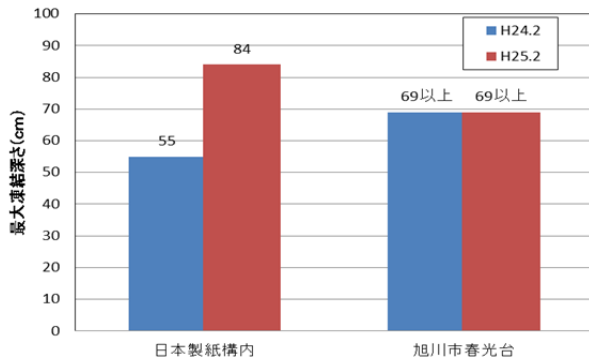


図-10 最大凍結深さ (日本製紙構内・旭川市春光台)

## (3) 現場CBR試験 (3年経過後) と粒度試験

日本製紙構内では、施工後約3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試験の試験結果を図-11に示す。凍上抑制層工区47.0%、下層路盤工区73.6%、比較工区75.5%を示し、各工区とも高い支持力を示した。図-12に年度別の凍結融解回数を示す。年度により凍結融解回数は異なるが、毎年5~10回程度の凍結融解は、下層路盤、凍上抑制層に作用している。日本製紙構内の試験施工の現場を開削後、再生骨材80mm級を採取し粒度試験を行った結果を図-13に示す。施工前、1年経過後、3年経過後の再生骨材の粒度を比較すると、1年経過後は、施工前に比べて凍結融解や転圧回数により細粒化が進行したが、3年経過後は凍結融解による細粒化の進行があまり進まなかった。

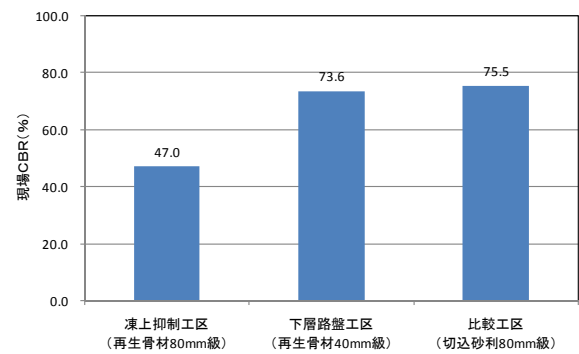


図-11 現場 CBR 試験 (日本製紙構内)

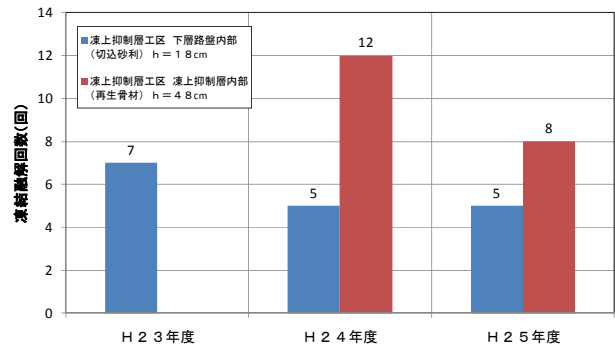


図-12 下層路盤・凍上抑制層の凍結融解回数

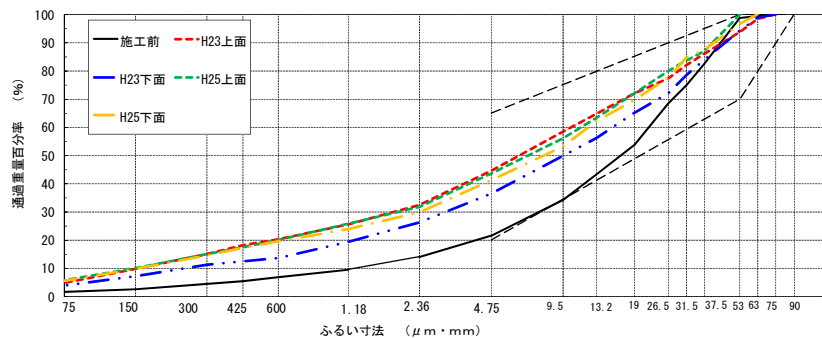


図-13 粒度分布の推移 (日本製紙構内)

凍上に影響を与える75 $\mu$ m以下ふるい通過量は5.7%であり、シルト分の増加はあまり見られない結果となった。

#### (4) FWD調査

旭川市東鷹栖・春光台の市道で再生骨材を使用した箇所、車載型重錘落下式路面たわみ装置（以下、FWD）を用い、D0たわみ量を測定した。FWDとは、重錘を落下させて路面に衝撃を加え、そのときに発生する路面のたわみ量を測定し、舗装の構造性能を評価する装置である。

図-14にFWD調査結果を示す。調査は平成24年、25年の融解期に調査を実施した。再生骨材工区と比較工区を比較すると、再生骨材工区のD0たわみ量は小さい値を示し、比較工区と同等程度以上の支持力を有していることを確認した。

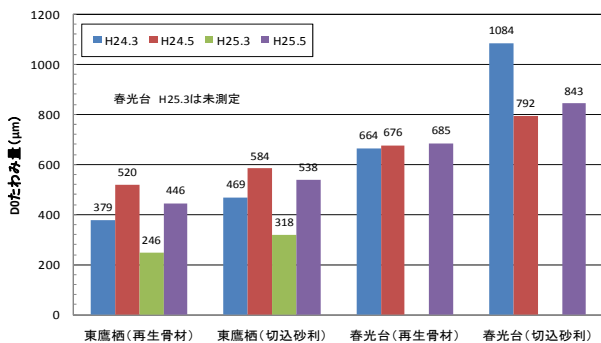


図-14 FWD調査結果（旭川市春光台・東鷹栖）

#### (5) 横断凹凸量調査

図-15に旭川春光台および東鷹栖の横断凹凸量調査結果を示す。旭川市春光台は供用後、約2年経過した路面性状結果である。再生骨材工区は比較工区と比較し、同等程度以上の供用性状を示している。旭川市東鷹栖の再生工区は供用後約4年、比較工区は約5年経過した区間である。再生工区も比較工区も良好な路面性状である。

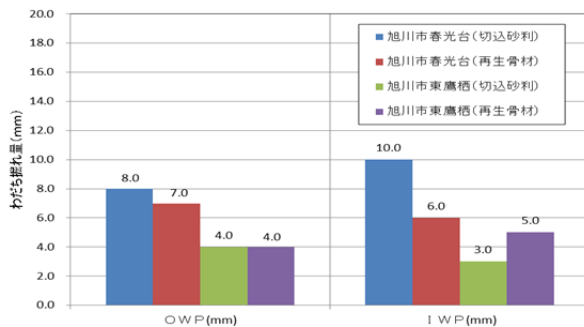


図-15 横断凹凸量調査（旭川市春光台・東鷹栖）

## 6. 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

- 凍上試験の結果から、非凍上性の材料である事が確認できた。凍結融解により再生骨材は細粒化するが、75 $\mu$ mふるい通過量に関する凍上抑制層の規格は満足している。また、凍結融解後のCBR試験の保存率は90%程度を示しており、凍結融解後の支持力低下は粗粒材と同等以上であることが確認された。
- 第二種特定有害物質の8項目の溶出試験を実施した結果、環境に悪影響を及ぼす物質の溶出はなかった。
- 締め固め度については、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。
- 現場試験において、3年経過後の粗粒材については凍上に影響を与える75 $\mu$ mふるい通過量の増加は少なく、支持力も高い値を示した。また、現地の凍上量は比較工区と比べ同程度であり、沈下等もなく、路面は良好である。
- FWD試験による融解期の支持力の調査では、再生骨材工区のD0たわみ量は比較工区と比較し、たわみ量小さく、十分な支持力を有した。また、横断凹凸量調査結果でも、同等程度の供用性状を示した。

以上の調査結果から、焼却灰を主材とした再生骨材は、凍上抑制層として適用可能と評価できる。

### (2) 路盤材料としての適用性

- 下層路盤材料としての適用については、融解期の支持力や凍上に関しては通常骨材と比較し、同程度の性状を有していることが確認できた。しかしながら、吸水率が高く、表乾密度が低い要因により、すり減り減量の規格値を満足しないことから、配合手法の更なる検討が必要である。

## 7. 今後の予定

今回の試験結果からは、再生骨材を凍上抑制層に用いることは可能と考えられるが、外気温や降雪等によって融解期の支持力や路面の評価等も異なる可能性がある。今後も引き続き、現地のデータを蓄積し、積雪寒冷地における焼却灰を原料とした再生骨材の適用性に関する検討を行いたい。なお、本検討は日本製紙株式会社、株式会社 NIPPO、寒地土木研究所の共同研究により行ったものである。

### (参考文献)

- 北海道開発局 道路・河川工事仕様書、pp. 2-158~2-160、平成 25 年度版
- 社団法人 日本道路協会：舗装再生便覧、pp. 111~118、平成 16 年 2 月