

平成24年度

焼却灰を主原料とした再生骨材の凍上抑制層への適用性に関する検討 —中間報告—

(独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○三田村 宏二
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、リサイクル資材の適用方法について検討している。本報告は、木屑、石炭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主原料とした再生骨材を凍上抑制層材料として適用するため、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. 背景

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%で、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。

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、その燃料には木屑、石炭、廃タイヤ、ペーパーラジック等を使用している。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で3万t程度あり、日本製紙 旭川事業所では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。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で混ぜ、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(図-1)。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)

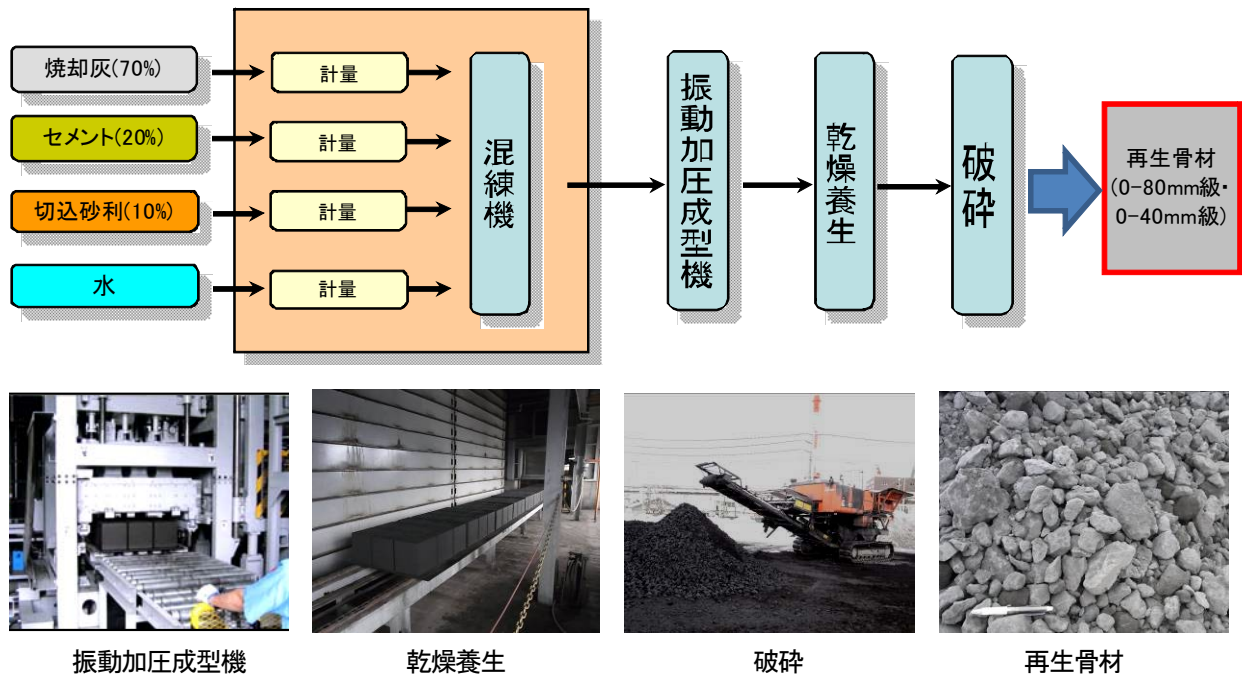


図-1 再生骨材の製造工程

3. 検討方法

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-1) 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(表-6)。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。

4. 材料試験結果

材料の性状を把握するため、再生骨材 80mm 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-2 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、軽量な骨材であることが確認された。

(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

表-1 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
突固め試験	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

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-3）、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-3、試験機の概要を図-2 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) 75 μm ふるい通過量

5mm ふるい通過量のうち、75 μm 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

表-2 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	(g/cm ³) 2.595	2.765	-	-
	表乾	(g/cm ³) 1.788	2.657	-	-
	かさ	(g/cm ³) 1.282	2.595	-	-
	吸水率	(%) 39.42	2.15	-	-
ロウンゼルス試験	すり減り率	(%) 57.8	23.6	-	45%以下
スレーキグ試験	スレーキグ率	(%) 0.5	-	-	-
CBR試験	CBR	(%) 89.9	-	-	-
	修正 CBR	2.5mm	74.5	84.9	-
修正 CBR試験	5.0mm	85.0	-	-	-
	土粒子の密度試験	(g/cm ³) 2.69	-	-	-
液性・塑性限界試験	液性限界	wL (%) NP	-	-	-
	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 碎石: 15%以下	砂利: 9%以下 碎石: 15%以下
安定性試験損失量	(%)	56.2	-	-	20%以下

表-3 凍上試験結果

試験項目	単位	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	-	-	-

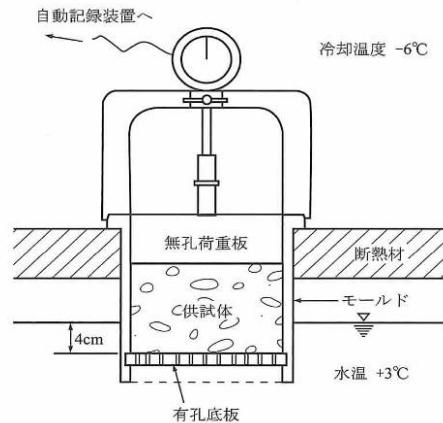


図-2 凍上試験機

表-4 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

行った。試験結果を表-4 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-3、図-4 に、凍結融解後の粒度試験結果を表-5 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

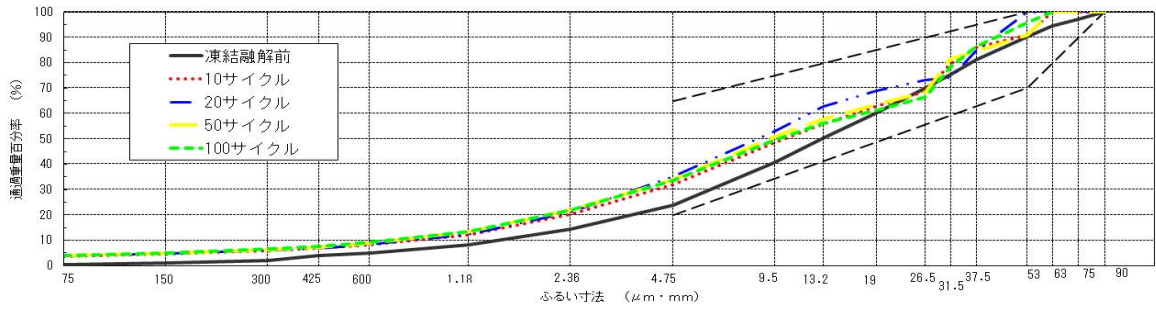


図-3 凍結融解による粒度曲線図 (切込砂利)

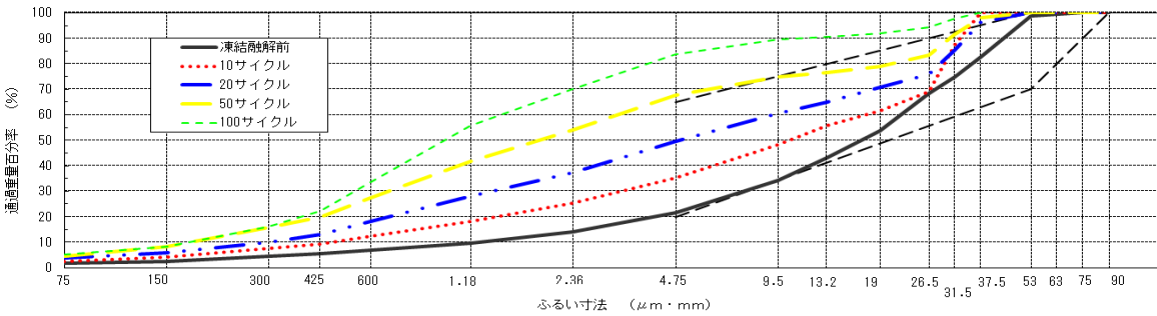


図-4 凍結融解による粒度曲線図 (再生骨材)

表-4 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
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			90.3	89.4	90.9	91.0	95.7
37.5	82.7	84.7	86.4	88.2	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

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 75 μm 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。

(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。

5. 現場試験結果

Koji Mitamura, Masayuki Kumagai, Ryuji Abe

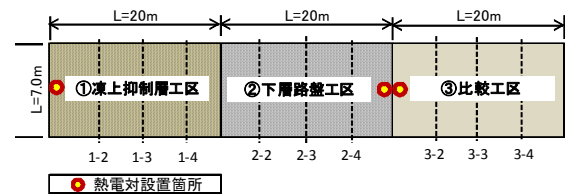


図-5 試験舗装平面図

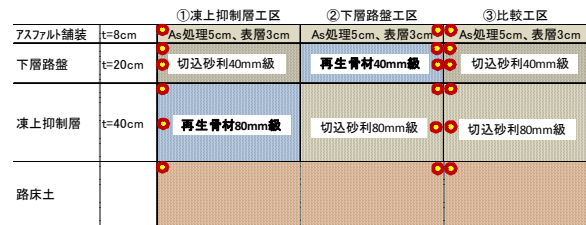


図-6 試験舗装定規図

表-6 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

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、日本製紙 旭川事業所の構内において、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-5、定規図を図-6、試験項目を表-6、試験結果を以下に示す。

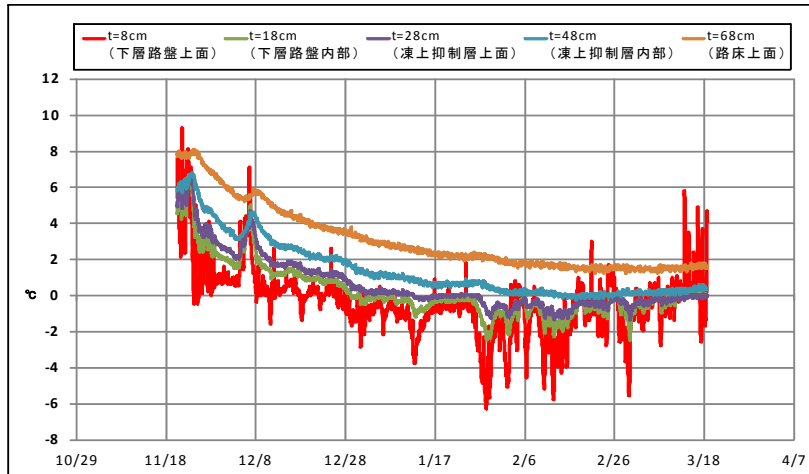


図-7 舗装体の温度計測データ (凍上抑制層工区)

表-7 凍上量の調査結果

測定日	工区名	測線	凍上量 (mm)					平均値
			1	2	3	4	5	
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-8 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	

表-9 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

(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-7、調査結果の一部を表-7 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-8、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。



写真-3 砂置換法 (現場密度試験)

(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。

(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



写真-4 現場 CBR 試験

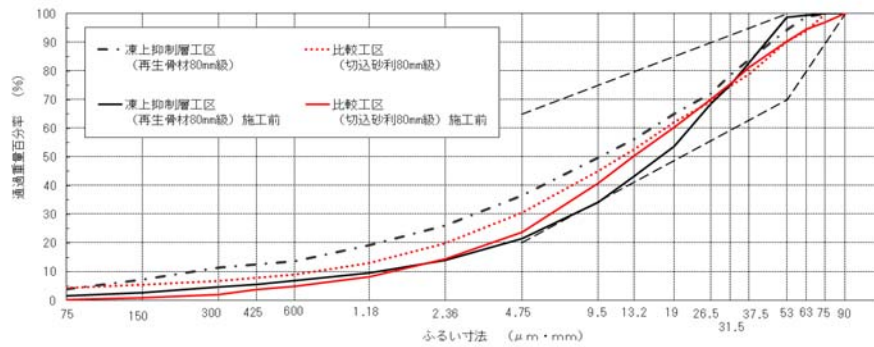


図-8 骨材粒度曲線図 (1年経過後)

表-10 粒度試験 (1年経過後)

	凍上抑制層工区 (再生骨材80mm級)	比較工区 (切込砂利80mm級)
90 mm	100.0	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)

-9、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-8、骨材の粒度試験結果を表-10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。

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

- 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。

5. 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、寒地土木研究所、株式会社NIPPO、日本製紙株式会社の共同研究により行ったものである。