

砕石スラッジを有効利用した再生路盤材及びコンクリート2次製品の製造技術に関する調査研究

二宮信治*・谷口秀樹*・三浦正昭**・管博久***・皮野基文****

*材料科学部・**日本文理大学工学部

弥生石材株式会社・*三和コンクリート株式会社

Processing Technology of Reproduction Subbase Course Material and Concrete Product that Effectively uses Crushed Stone Sludge

Sinji NINOMIYA*・Hideki TANIGUTI*・Masaaki MIURA**・Hirohisa KAN***・Motohumi KAWANO****

*Material Science and Technology Division・**Nippon Bunri University

Yayoi Sekizai Co.Ltd.・*Sanwa Concrete Co.Ltd.

要旨

砕石スラッジを有効利用する方法として、石灰バグフィルターダストやセメントスラッジといった水和反応を起こし固化材として作用する無機系廃棄物と混合、乾燥させることによって、採石スラッジ固化物の製造を目指した。この砕石スラッジ固化物の用途は再生路盤材およびコンクリート2次製品である。再生路盤材において最も重要な試験項目である修正CBR試験を実施したところ、目標規格は達成できていることが明らかになるなど、実用化を加速させるいくつかの知見が得られた。

砕石スラッジ固化物を用いたコンクリート2次製品の開発では、試作したインターロッキングブロックで高い保水性とそれによる昇温防止性能が確認された。

1. はじめに

1.1. 背景と目的

天然砂利、砂等のコンクリート用骨材資源の枯渇に伴い、粗骨材及び細骨材として砕石、砕砂が道路、橋、建物等の社会生活基盤の整備に積極的に用いられている。また、排水性舗装や低騒音舗装の需要の増大からアスファルトコンクリート用砕石の粒度及び粒形の高品質化が求められている。

採石工場では上記の要請のため、砕石、砕砂の製造過程で水洗し、表面の微粒の石の粉を取り除いており、その廃水処理に伴って発生する砕石微粉末の脱水ケーキ（砕石スラッジ）の発生量も年々増加している。

これらの大部分は利用されることなく処分されており、省資源・省エネルギー・環境保護の面からも有効利用を図らねばならない。共同研究者の弥生石材（佐伯市）でも、採石工場内に貯蔵するのみで活用できていない。

本研究の目的は、石灰バグフィルターダストの水硬性機能によって砕石スラッジを固形化させた再生路盤材を開発すること及び砕石スラッジを配合した廃棄物利用コンクリート2次製品を開発することである。

1.2 研究概要

砕石製造時に副産物として発生する砕石スラッジの有効利用を図るため再生路盤材を開発する。固化手段として、石灰製造企業において石灰石を加熱して生石

灰を製造する過程で副産物として発生する微粉末の石灰等を含む燃焼灰（バグフィルターダスト）を用いる。古手川産業（津久見市）では有効利用されないまま処分されているが、このバグフィルターダストには生石灰成分が含まれているために砕石スラッジ中の水と反応し、固化（水硬性機能）するものと考えている。

また、セメントスラッジや石膏ボードくず（建設物解体時に発生）等を配合し、それぞれ単独では利用方法がない副産物や廃棄物を再生路盤材の原料とする。

また、上記の副産物の発生源が弥生町、津久見市、臼杵市であり、土木資材のコストの大きく占める運搬費用をミニマムにできることも本研究の優位点である。

さらに、コンクリート2次製品製造者（三和コンクリート：豊後大野市）では、砕石スラッジを添加したエコ商品の開発についても検討した。

2. 実験・結果と考察

2.1. 製造条件最適化・製造プロセス設計

未利用の砕石スラッジ（SS）を下層路盤材や上層路盤材として有効利用するために、低コストで、固形化する技術の開発を検討した。

まず固形化材として用いる石灰バグフィルターダスト（BF）及びセメントスラッジ（CS）ならびに保水調整能が期待される石膏ボードくず（GB）の配合比の最適化と混練時の水比（含水比）

の最適化を行った。混練方法として、高粘度材料の混合に利用されるオムニミキサタイプのミキサ (Fig. 1-1) を主体に検討した。その結果、路盤材評価の一基準である圧縮強度が最大となる配合比は重量比でSS:BF:CS:GB=3:1:1:1であり、水比は7%であった。さらに低水比により高圧縮強度が期待できると思われる。

上記の配合条件で混練した砕石スラッジ固化物 (SS固化物) の路盤材としての強さ評価する試験 (修正CBR試験) を行った。

試験供試体としてRC40との混合比率をSS固化物:RC40=10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50としたときのそれぞれの修正CBR値は、45%, 50%, 51%, 32%, 44%であり、強度目標である下層路盤材 (コンクリート舗装) の材料規定である修正CBR値=20%をクリアできた。

以上、「オムニミキサ」を使用して製造した砕石スラッジ固形物の配合比率及び下層路盤材としての使用の可否についてその詳細を述べたが、今回 (オムニミキサ使用) の研究で確認できた項目を上記2項目も含めて要約すると、

① 配合比率は3:1:1:1 (砕石スラッジ:セメントスラッジ:石灰バグフィルターダスト:石膏ボードくず) が適当である。

② 下層路盤材に用いる再生路盤材 (RC40) としては、安全性を考慮すると砕石スラッジの混合比率としては30%程度が適当と考えられる。

③ オムニミキサを用いることによって造粒化されること、また任意の寸法 (直径) の造粒化が可能なが予期せぬ現象として確認された。

「造粒砕石スラッジ (Fig. 1-2)」 (他の形状の砕石スラッジ固形物と区別するため「造粒砕石スラッジ」、略称として「造粒SS」と表記する) の最大寸法は含水量によって自由に制御できる。水を増やすと大きくなり、減らすと小さくなることが判明した。

④ 配合比率3:1:1:1の場合、含水量が圧縮強度に及ぼす影響は含水量が大きくなると若干強度の低下が認められるが、含水量30~40%程度の範囲であればその影響は比較的小さい。

以上が造粒砕石スラッジに関する試験結果である。

この「造粒砕石スラッジ」の用途としては、今回検討した「路盤材」としての方向性よりも、軽量、多孔質、球形という品質特性を活かして、「低品質 (低強度) 軽量骨材」としての製品化を図る方が付加価値を高めることができるのではないかと考えている。即ち、軽量、保水、吸水、断熱、遮音といった特性を持たせたプレキャストコンクリート製品 (エコブロック、断熱板、遮音板等) の骨材としての用途の開発を目指すべきではないかと考えている。

以上の「オムニミキサ」を用いた実験結果と考

察を参考に、本来の目的である砕石スラッジの大量使用が見込まれる路盤材としての方向性を探るために、オムニミキサではなく一般に広く使用されている「可傾式ミキサ」 (重力式ミキサ) を用いて予備実験 (室内実験) を実施した。

その結果、得られた要項をまとめると、

① 原材料としての砕石スラッジ及びセメントスラッジの含水率は、オムニミキサ使用の場合に比較して高い含水率の方がよい。即ち採石場、生コン工場から搬入される時の砕石スラッジ、セメントスラッジはかなり軟らかい方が練り混ぜやすく、かつ均等質に練り混ぜられる。

② 搬入時の砕石スラッジ及びセメントスラッジが若干硬めの場合 (湿っている状態で、指を押し込むのにある程度力が必要と思われる程度の軟らかさ) でも、可傾式ミキサで練り混ぜるとき加水することによって使用可能である。この場合、混合物の含水率が30~40%程度の範囲になるように管理するのが望ましい。

③ 混合物の含水率を加水しながら30~40%程度の範囲に管理することは一見難しそうであるが、数回の練り混ぜを経験すると管理幅が広いだけにそれほど難しいものではないことも確認している。

しかし実用段階においては、搬入時あるいはミキサ投入時の砕石スラッジ及びセメントスラッジの含水率の管理をすべきであろう。

④ ミキサへの原材料の投入方法 (順序) は、1) 砕石スラッジ投入・練り混ぜ、2) セメントスラッジ投入・練り混ぜ。このあとに練り混ぜる石灰バグフィルターダスト及び石膏ボードくずが乾燥状態であるから1)、2) の砕石スラッジとセメントスラッジの混合物の状態は、かなり軟らかめのスラリー状となる (このスラリーの状態の管理も今後の課題である)。

次に、3) 石灰バグフィルターダスト投入・練り混ぜ、最後に4) 石膏ボードくず投入・練り混ぜの順番が適当と思われる。

⑤ 全材料投入後の混合物の状態を観察して、硬いと思われるときには加水して混合物の含水率が30~40%の範囲になるように管理することになる。

⑥ この程度の含水率に管理された混合物は、4週程度で2N/mm²から3N/mm²台の圧縮強度が得られる。供試体の形状寸法は直径50mm、長さ100mmの円柱供試体である。よく締固めた供試体を材齢4~5日に脱型して、養生は試験材齢まで実験室内に静置 (気乾養生) した。

以上が、可傾式ミキサを用いて4つの廃棄物を練り混ぜた場合の見解である。

次に平成17年8月4日 (木)、弥生石材 (株) の採石場で実用化に向けた方向性を検討するために現場実験を実施した。その結果について、

1) 混合物製造実験

2) 再生路盤材RC40の修正CBR試験

の2つに分けて報告する。

1) 混合物製造実験

これまでの室内試験の結果をもとに、各材料(廃棄物)の混合比率は、砕石スラッジ(SS):セメントスラッジ(CS):石灰バグフィルターダスト(BF):石膏ボードくず(GB) = 3:1:1:1とし、1回の練り混ぜ量は後述するミキサの容量を考慮して、SS:CS:BF:GB = 900kg:300kg:300kg:300kgの配合とした。

上記の4種類の原材料(廃棄物)を練り混ぜるためのミキサとして、生コン車のアジテータ(練り混ぜ機能ではなく「攪拌機能」をもったもの)を使用することにした。原材料(廃棄物)の準備の都合で、容量2m³の生コン車(一般によく見かける生コン車は容量4.5m³)を用いることになった。

(参考)生コン車のアジテータは本来練り混ぜを行う機能を有していないので、今回の実験のように「練り混ぜ」を行うための「ミキサ」として用いることは機械の持つ性能の目的外である。

今回、練り混ぜに生コン車のアジテータを使用したのは、2m³に近い量を練り混ぜうる移動可能なミキサがなかったこと、また練り混ぜ性能の劣るアジテータを用いた混合物の状態を観察することによって、実用化を目指すときの実機に求められる練り混ぜ性能が推測されると考えたこと、等が主な理由である。

生コン車を使った製造実験の実験工程は、生コン車のポッパーからアジテータ内に(Fig.1-3)、

- ① 砕石スラッジ1/2(約450kg)を投入・攪拌(30秒)
- ② セメントスラッジ1/2(約150kg)を投入・攪拌(30秒)
- ③ ①②の作業を繰り返して砕石スラッジとセメントスラッジの全量を投入・攪拌
- ④ 引き続き石灰バグフィルターダスト1/2(約150kg)を投入・攪拌(30秒)
- ⑤ 石膏ボードくず1/2(約150kg)を投入・攪拌(30秒)
- ⑥ ④⑤の作業を繰り返して全材料投入
- ⑦ ④⑤⑥の時点で、アジテータ内の混合物の状態を確認(目視)したところかなり固めであったので、段階的に約150ℓの加水をして約30秒の高速攪拌後、混合物をアジテータを逆回転させることによって混合物を排出した。1/3程度の混合物は排出できたが、残りの大部分は排出不可能であった。
- ⑧ 排出をスムーズに行わしめるため、かなりの量の水を加えた。その結果、流れるような状態で混合物が排出された(Fig.1-4)。
- ⑨ 排出した混合物はあらかじめ掘っておいたピット(ブルーシート敷)に投入し、上にブルーシートをかけて静置しておいた。この混合物の強度

を調べるために簡易な円柱形の供試体を2本採取(Fig.1-5)した。

上記の実験に使用した材料及び混合物の含水率は下記のとおりである。

砕石スラッジ(搬入時)	25.2%
セメントスラッジ(搬入時)	54.5%
混合物(150ℓ加水時、⑦の状態:図1-10)	32.9%
最終混合物(流れるような⑧の状態)	37.8%

不注意で計測を怠ってしまったが、⑦から⑧の状態に至る間に加水した水の量は、相当な量であった。200ℓ以上あったと思われるが、⑦、⑧の時点での混合物の含水率の違いは約5%程度と思ったよりもずっと小さかった。今後の加水管理面で大きな参考になるものと思われる。

製造から15日目に40mmアンダーに破碎(Fig.1-6)した。その時の混合物、すでに固形物になっているわけだが、その状態(硬さ等)を見て共同研究者の一人である弥生石材(株)の管社長は「なかなか立派なものできている。再生路盤材の一部として十分だ」との感想を述べられたと報告を受けている。

今回の現場実験で得られた最も大きな知見は、練り混ぜ性能の悪い生コン車のアジテータにもかかわらずオムニミキサでは得られなかった混ざり具合のよい均等質の練り混ぜ混合物が得られたことである。特に、相当量加水した含水率37.8%の流れるような状態の混合物だけでなく、含水率32.9%の比較的硬い混合物さえも均等質な組織になっていたことである。

オムニミキサの場合、後者程度の軟らかさの混合物の場合でも、砕石スラッジかセメントスラッジのいずれか硬めの方が固形(球形)の核となり、その周りにその他の軟らかいものが付着するといった2層の構造(組織)になっていたと思われる。

圧縮強度は材齢28日で1.5N/mm²であった。尚、圧縮試験用の供試体は正規の円柱形の型枠にて成型したものではないことを考慮すると、前述の可傾式ミキサを用いて行った予備実験で得られた2N/mm²から3N/mm²相当の強度が出ているものと推察している。圧縮試験における実際の破壊も成型時のしわ(キズ)の部分から起こった。

2) 修正CBR試験

材齢15日に40mm以下に破碎した固化した混合物を、従来から弥生石材(株)で製造されている再生路盤材RC40に30%混合したRC40を製造した。この再生路盤材RC40の下層路盤材としての適否を調べるために、修正CBRを含む骨材試験を外部機関に依頼した。

その結果、修正CBRは50.6%であった。「アスファルト舗装要綱」によると、下層路盤材の修正CBRは20%以上と規定されており、砕石スラッジ等4種類の廃棄物の固形物を30%混合した「再生路盤材RC40」は、下層路盤材としての強度を



Fig. 1-1 オムニミキサ



Fig. 1-2 造粒碎石スラッジ



Fig. 1-3 原料投入



Fig. 1-4 混合物排出



Fig. 1-5 強度試験用供試体



Fig. 1-6 破碎

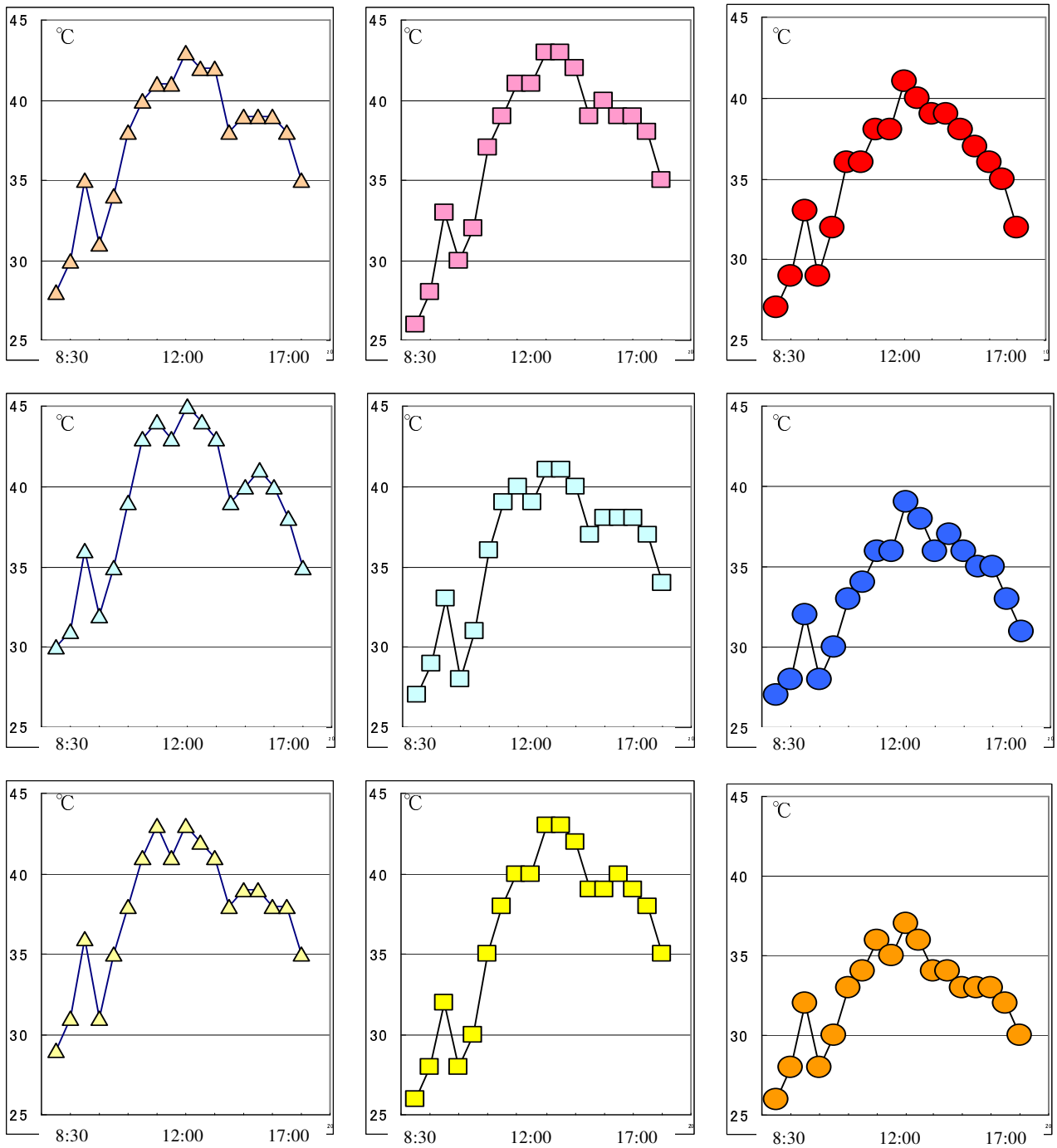


Fig. 2 直射日光下におけるインターロッキングブロック表面温度の経時変化

上段：通常型ブロック（保水機能なし）

中段：通常保水ブロック

下段：試作保水ブロック（造粒 SS 混合）

左列：乾燥（乾燥状態でアスファルト上で測定）

中列：水吸収（25hr 水没後アスファルト上で測定）

右列：水浸漬（24hr 水没後水を張ったバット(水深 20mm)に浸漬状態で測定）

Table 1 インターロッキングブロック試作品の配合比率 (kg/m³)

	水	セメント	水砕スラグ	造粒 SS	砕石 5-2.5	顔料
試作保水ブロック	91	350	832	454	-	7.7
通常保水ブロック	91	350	832	-	631	-

試作品形状：200×100×60mm

Table 2 インターロッキングブロック試作品の保水性と曲げ強度

	曲げ強度 (N/m ²)	保水性	
		保水量 (g/cm ³)	吸上げ高さ (%)
試作保水ブロック	2.95	0.286	96
通常保水ブロック	5.83	0.182	96
品質規格	3.0 以上	0.15 以上	70 以上

※試験方法：保水性舗装用コンクリートブロック品質規格による

十分有することが確認された。

また、その他の性質もアスファルト舗装要綱の規定に適合している。

2.2 コンクリート2次製品化

造粒SSを混合した保水機能を有するインターロッキングブロックを試作した。その配合比率等をTable 1 に示す。

試作品は通常品の砕石を造粒SSに置き換えたものである。

試作品についてその曲げ強度、保水性および屋外昇温試験を行った。曲げ強度と保水性試験の結果をTable 2 に示す。

曲げ強度は試験体三個のデータの平均を表示しているが、造粒SSを混合した試作品は通常品の半分程度に低下している。しかしそれでも品質規格とほぼ同等の値が得られた。今回は通常品の配合比を試作品にも適用しており、今後造粒SSの混合に適した配合条件を検討することで、規格を越える強度を得ることは十分可能であると考えられる。保水性の指標のうち吸上げ高さは試作品と通常品に差はなかったが、保水量では試作品が大きく上回った。造粒SSの添加は強度的にはマイナスだが、保水性の向上にはきわめて有効であることが確認された。

保水性インターロッキングブロックは夏季の路面温度上昇を低減させるのに有効であるといわれている。そこで直射日光下での屋外昇温試験を行い、その効果を検討した。

その結果をFig. 2 に示す。

水浸漬（ブロックの下部を水に漬けた状態での測定）では最高到達温度は通常型ブロックが41℃、通常保水ブロックが39℃、試作保水ブロックが37℃で造粒SS混入の効果が認められた。しかし水

を吸わせたあと水に浸漬しない状態での測定では通常保水ブロックのほうが温度が低くなっており、今後さらに踏み込んだ検討が必要であると思われる。

3. おわりに

本研究は

- ① 原料は廃棄物・未利用副産物 100%.
- ② 乾燥・焼成などのエネルギー多消費工程を含まない省エネ製法.
- ③ あえて高付加価値化を目指さず、安価で大量消費出来る製品の開発.

などの特徴を持ち、本年度、実用化に極めて近い位置にまで到達したものと考えている。

今後とも現在の研究体制を維持、発展させながら、実用化に向けた研究を継続する予定である。

謝辞

本研究は(財)大分県産業創造機構「平成 16 年度新産業重点創出事業」によって行われた。

産学官交流促進事業（大分県工業団体連合会主催）において「石粉の用途開発」グループの三和(株)丸山巖顧問、(財)大分県産業創造機構小林茂参与、古手川産業(株)菅原清事業開発室長、龍南運送(株)戸高豊秋課長、小野本コンクリート(株)小野本英彦社長には研究進捗について検討いただいた。

実験試料については、古手川産業(株)菅原清事業開発室長、龍南運送(株)戸高豊秋課長、志村生コンクリート(株)首藤昭二工場長にご協力いただいた。

土質試験については(株)ソイルテック中元億朗常務取締役にご助言いただいた。

上記の関係各位に謝意を表します。