

砕石スラッジの資源化に関する研究

EXPERIMENTAL RESULT ABOUT CRUSHED STONE SLUDGE TO RESOURCE

万波一朗*・小嶋利司**

by Ichiro MANNAMI and Toshiji KOJIMA

1. はじめに

コンクリート用の砕石や砕砂は、湿式（水洗い）または乾式分級の工程を経て生産される。分級により発生した細粒分は副産物となり、一部材料として利用されているが、その大部分は場内堆積、あるいは多大な費用を投資して場外搬出しているのが現状である。いずれの場合も資源の一部を廃棄物として処分しており、省資源・省エネルギーの面からも副産物の資源化は重要なテーマである。

また、21世紀の舗装技術として低騒音舗装や排水性舗装の需要拡大が予想されており、これら新舗装の機能を十分に発揮させるには、骨材の最大粒径を小さくし形状を球に近づけるなどの高品質化が求められている。これと同時に従来、アスファルト用細骨材には主に天然砂が使用されてきたが、天然砂は採取地の制限などにより将来的には安定供給が厳しくなるため、天然砂に代わる材料として砕石工場で生産される砕砂の需要が増大すると考えられている。このため、副産物の発生量は今後増加することが予想される。

この廃棄物化されかねない副産物を資源として有効に活用する方法とについて大学・建設省・道路業界・砕石業界で委員会をつくり、検討を行っている。今回は、この委員会での実験成果の概要について報告する。なお、ここでは湿式分級により発生した細粒分を脱水処理したケーキ状のもの（以下「砕石微粉末」という）を対象とした。

2. 有効利用の方策

有効利用の方策として路盤材への添加を選定した理由は以下の通りである。

①砕石微粉末の利用量が大きい。

砕石微粉末の利用に関しては、以前から各種の方法について研究が行われ、付加価値のついた有効利用方法の開発がなされているが、その利用量は小さく、大量に発生する砕石微粉末を処理できない。路盤材の需要は減少方向にあるが、その量は他の用途

に比較して大きいと考えられる。

②安定した利用が図れる。

埋戻し材、盛土材や充填材等の土木向け用途では利用量が比較的大きいが、単発的な場合が多く、利用量の先行きが不透明なため、材料のストックを必要としたりなどの生産上支障を生じることが考えられる。また、リサイクル法の施行により建設工事現場においても現地発生土を積極的に活用することが求められており、砕石微粉末の利用が図れる工事を確保することが難しい状況にある。砕石製品の生産工程は各工場により異なるが、コンクリート用も路盤材も同時に生産しており、砕石微粉末を路盤材へ計画的に添加できると考えられる。

③取り組みやすい

路盤材は砕石業においても取り扱っている製品であり、その品質や生産および流通において取り組みやすい方法であると考えられる。

3. 基本調査

砕石微粉末を路盤材に添加して有効利用を図るための基本性状として、砕石微粉末の性状および路盤材添加後の支持力（修正CBR）およびPIの傾向を確認し、概ねの仕様について検討した。

3.1 使用材料

試料は関東地区にある砕石業者13社の砕石微粉末を用いた。また、このうち表-1に示すA, B, Cの3社について詳細試験を実施した。路盤材は砕石微粉末と同一工場より採取し、C-40、M-30の粒度規格の中央となるよう粒度調整を行い試験に供した。また、砕石微粉末と路盤材の混合は、同一工場の試料により行った。再生路盤材はコンクリート破砕物とアスファルト破砕物をRC-40では6:4、RM-30は9:1の割合で混合し、路盤材と同様に粒度調整して試験に供した。

3.2 試験結果

(1) 砕石微粉末の性状

表-1には砕石微粉末の性状例を示す。砕石微粉末は、細粒分（シルト以下）の含有率が90%以上であり、含水比は20~30%と低いが、CBR=0.4~1.3%と軟弱であり、また粘性が高いため取扱いにくいのが特徴である。

* (社) 日本砕石協会砕石スラッジ資源化委員会 幹事

** 奥多摩工業株式会社 東京都西多摩郡瑞穂町 107

表-1 砕石微粉末の性状例

試料No	A	B	C	
工場所在地	東京	神奈川	栃木	
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.733	2.719	2.701	
含水比 (%)	29.0	20.4	25.9	
粒度特性	礫分 (%)	0	0	0
	砂分 (%)	8	10	8
	シルト分 (%)	48	58	47
	粘土分 (%)	44	32	45
液性限界 (%)	49.8	28.6	34.5	
塑性限界 (%)	29.5	15.9	18.8	
塑性指数	15.0	12.7	15.7	
設定CBR (%)	1.3	0.8	0.4	

図-1は砕石微粉末に生石灰を2%添加した場合の塑性図における砕石微粉末の土質分類である。砕石微粉末の大部分はML(低液性限界のシルト)に分類される。

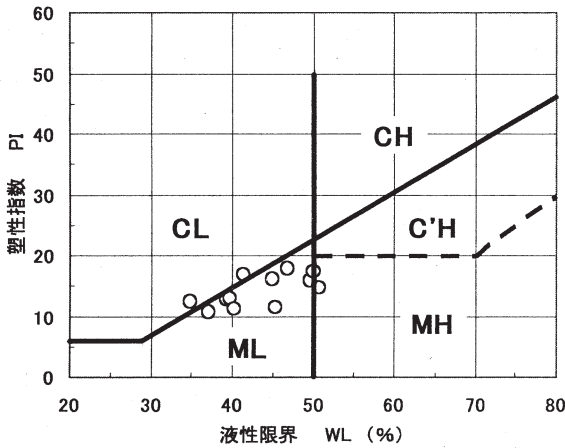


図-1 塑性図による砕石微粉末の分類

(2) 安定材の効果

砕石微粉末を路盤材料へ添加する方法として事前に安定材による改良について調査した。

安定材は、一般に土質安定処理に用いられている生石灰およびセメントを用いた。図-2は試料Aの砕石微粉末を未処理および生石灰・セメントにより安定処理し、M-30に混合した場合の修正CBR試験の結果である。なお安定材添加率は砕石微粉末の乾燥重量に対する安定材重量比である。

未処理およびセメントにより安定処理した砕石微粉末の場合、混合率の増加に伴い修正CBRは小さくなる傾向だったが、生石灰により安定処理した砕石微粉末では混合率20%まで修正CBRは若干大きくなり、それ以上の混合率では小さくなる傾向であった。また試験時の観察によれば生石灰処理をすることにより、砕石微粉末の粘性が無くなり取り扱いが容易になることが分かった。

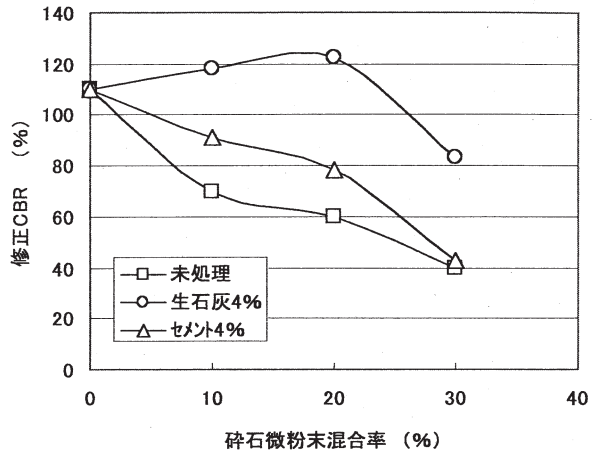


図-2 安定材の効果

(3) 各材料による砕石微粉末と修正CBR

試料BおよびCを用いて、生石灰により安定処理した砕石微粉末と路盤材を混合した材料について修正CBR試験およびPI試験を実施した。その結果を図-3~5に示す。なお生石灰添加率は混合後の取扱い性を考慮して、試料Bは2%、Cは3%とした。

図-3はC-40に砕石微粉末を混合した場合の砕石微粉末混合率と修正CBRの関係である。試験に供したC-40は単味の場合でも修正CBRが100%以上であった。修正CBRは試料B、Cとも混合率10%で最大となり、それ以上の混合率では小さくなる傾向であった。しかし、試料Bでは混合率30%、試料Cでは混合率20%においても単味の場合と修正CBRは同等であった。

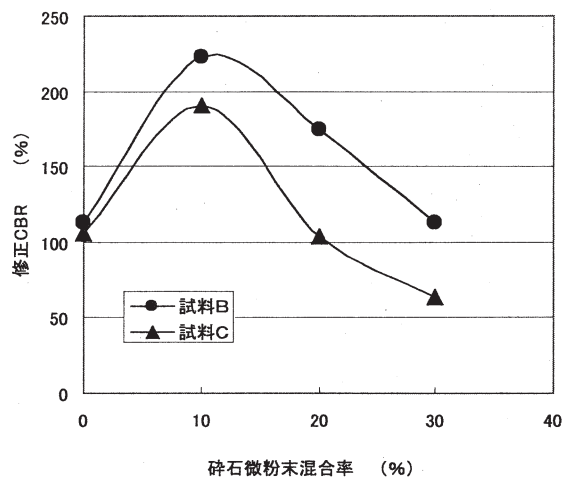


図-3 砕石微粉末混合率と修正CBRの関係 (C-40)

図-4はRC-40およびRM-30に砕石微粉末を混合した場合の砕石微粉末混合率と修正CBR

の関係である。修正CBRは混合率10%~20%の間で最大となり、それ以上の混合率では小さくなる傾向であった。その傾向はC-40の場合と比べて緩やかであった。また混合する碎石微粉末の違いにより修正CBRに差がないことが確認された。

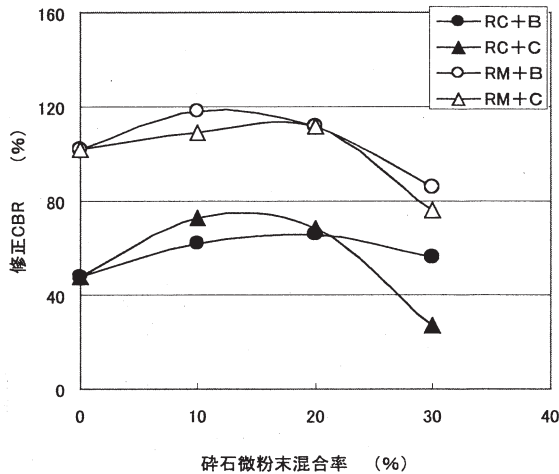


図-4 碎石微粉末混合率と修正CBRの関係 (再生路盤材)

(4) 碎石微粉末混合率とPI

図-5は、C-40およびRC-40に碎石微粉末を混合した時のPIを示す。なおRM-30については碎石微粉末を混合した場合にもNPのため図から省略した。碎石微粉末を混合すると混合率10%においてもPIが現れ、混合率の増加と共にPIが増加することが確認された。

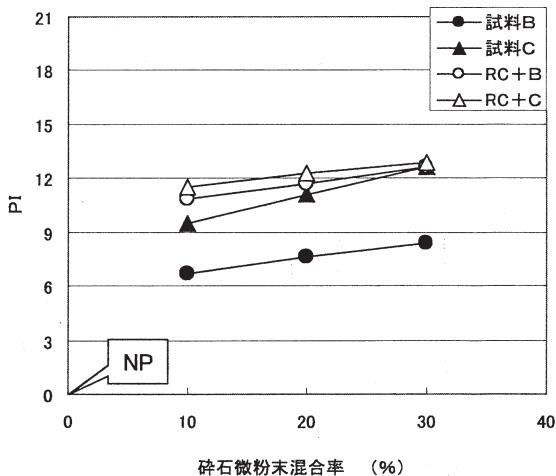


図-5 碎石微粉末混合率とPIの関係

(5) 基本性状調査のまとめ

碎石微粉末を路盤材として資源化するための基本性状調査を検討した結果、以下のことが確認された。

- ①碎石微粉末は、未処理のままでは取扱いが悪く、

また路盤材に混合すると修正CBRが低下するため、生石灰により安定処理を行うことが必要と考えられる。

- ②生石灰処理した碎石微粉末を混合した路盤材の修正CBRは、混合率10%~20%の範囲で最大となり、それ以上の混合率では小さくなる傾向である。

- ③碎石微粉末を混合した路盤材のPIは大きくなる。

4. 耐久性状に関する調査結果

基本性状調査より碎石微粉末を混合した路盤材は、碎石微粉末混合率20%程度までは支持力(修正CBR)の面では十分に機能があると考えられる。しかし、PIが大きいことから水の影響に関わる耐久性について疑問が残った。

そこで、室内試験により水浸時の長期安定性、交通荷重下でのこね返し特性および低温時の凍上特性について調査した。

4.1 碎石微粉末の選定および碎石微粉末混合路盤材の基本性状

(1) 碎石微粉末試料

試料は関東地区13社の碎石微粉末から次の条件で3種類選定した。

試料D：図-1塑性図でCL(粘土質土)領域

試料E：PIが大、石灰処理後のCBRが小

試料F：PIが小、石灰処理後のCBRが大

(2) 路盤材試料

碎石微粉末試料と同一の工場よりC-40を採取し、粒度規格の中央粒度に調整して試験に供した。

(3) 碎石微粉末混合路盤材

同一工場の路盤材と石灰処理碎石微粉末を8:2で混合した。碎石微粉末混合路盤材の性状を表-2に示す。

表-2 碎石微粉末混合路盤材の性状

試料No	D	E	F
工場所在地	神奈川	東京	神奈川
碎石微粉末の含水比 (%)	18.1	27.8	25.1
最適含水比 (%)	7.3	8.9	10.4
最大乾燥密度 (g/cm ³)	2.214	2.092	2.093
修正CBR (%)	98.5	140.8	115.6
95%密度相当突固め回数 (回)	34	60	60
同上のCBR (%)	102.7	101.0	120.4

※生石灰添加率 D=2%, E=3%, F=2%

4.2 耐久性状調査結果

(1) 供試体作製方法

耐久性の調査用の供試体は、修正CBR試験より、95%密度に相当する突き固め回数を求め、その突き固め回数により供試体を作製した。

(2) 長期強度特性

供試体を JIS A 1211 に示す方法により水浸を行い、4日（標準養生）、1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月後の CBR を求めた。試験結果を図-6 に示す。養生期間の増加に伴ない CBR は微増～増大する傾向であった。これは、碎石微粉末に混合した生石灰の安定処理効果によるものと考えられる。水存在下であっても長期強度特性は問題ないことが確認された。

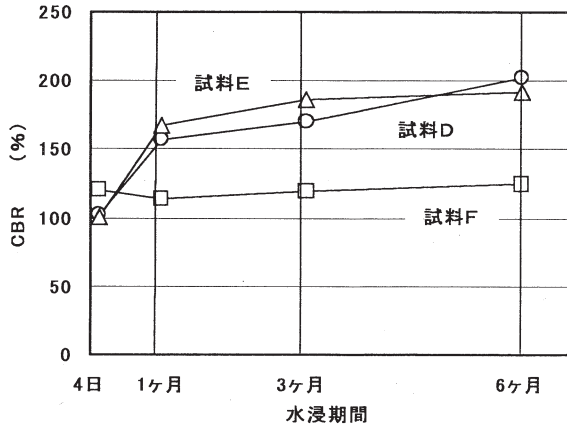


図-6 長期強度特性

(3) こね返し特性 (水浸繰返し荷重試験)

碎石微粉末混合路盤材が水存在下で繰返し交通荷重により、こね返し作用を受けた場合の支持力について、図-7 に示す実験を行い調査した。繰返し荷重荷重の条件は、

- ①設計交通量の区分 L 交通
- ②路床土 CBR 3～12%
- ③輪荷重 7 t

とし、碎石微粉末混合路盤材を下層路盤に用いた場合の、路盤材面にかかる応力算定した。

水浸養生4日後、荷重パルスは2Hzとし、繰返し荷重を15万回（約21時間）までかけた。

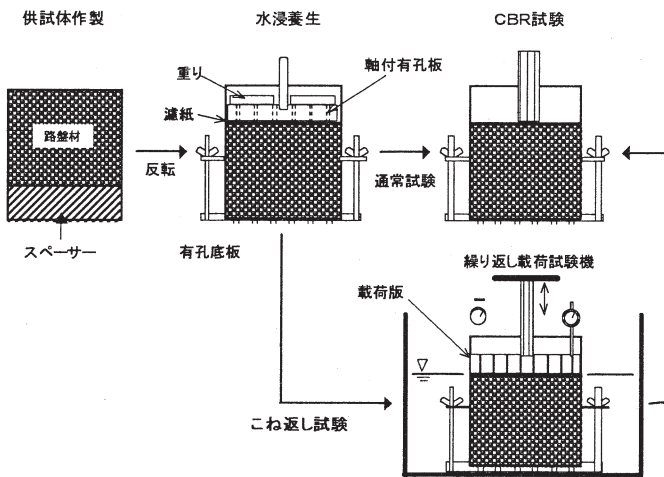


図-7 こね返し試験概要

試験結果は表-3 に示すとおりであり、こね返し後の CBR は、高いレベルにあるものの、低下する傾向であった。また、沈下量は比較的小さいと考えられる。繰返し 15 万回は L 交通（大型交通量 100 台/日）として約 4 年要する量であって、水浸状態での荷重はかなり過酷な条件であると思われるが、この結果より、地下水位が高い箇所へ適用する場合には留意が必要であると考えられる。

表-3 こね返し特性

試料No		D	E	F	
標準CBR※1	(%)	102.7	101.0	120.4	
沈下量※2	(mm)	1	0.27	0.59	0.22
		2	0.29	0.34	0.90
		3	0.32	0.74	1.61
		平均	0.29	0.56	0.910
15万回繰返し後 CBR	(%)	1	59.4	80.0	83.6
		2	83.0	83.6	73.0
		3	60.4	104.9	60.2
		平均	67.6	89.5	72.3

※1：95%密度相当突固め回数による CBR

※2：荷重装置セットから 15 万回繰返し後の沈下量

(4) 凍上特性

細粒分（シルト）が混合されることにより、路盤材が凍上することが考えられたため、碎石微粉末混合路盤材の凍上特性について調査した。凍上試験は図-8 に示す試験装置を用いて、日本道路公団規格「土の凍上試験方法」（JHS 112-1992）のφ15法に準じて、水浸膨張試験後の供試体について144時間凍上試験を行った。

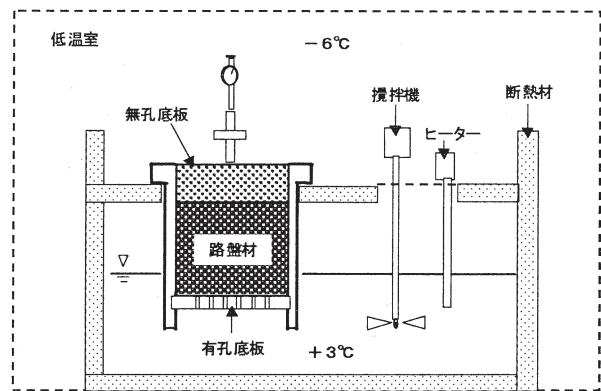


図-8 凍上試験概要

試験結果は表-4 に示すとおり、いずれの試料においても凍上性が認められ、凍上率7～9%、凍結様式は2（一部3）であった。（凍結様式は、土中の氷の結晶状態をその程度により1～5に分類したものであり、数字が大きいほど凍上性が大きい。）また、凍上後の表面による CBR は膨張の影響で低下が著しかった。

表-4 凍上特性

区分	測定項目	D	E	F
水浸前	含水比 (%)	7.1	9.1	9.6
	乾燥密度 (g/cm ³)	2.089	2.083	2.100
	間隙率 (%)	23.2	29.8	29.5
	(水分体積)	14.8	17.3	18.4
水浸膨張試験	膨張比 γ_e (%)	0.014	0.022	0.020
凍上試験	凍上率 (%)	8.9	8.3	7.6
	凍上様式	2~3	2	2
凍上後	含水比 (%)	13.4	17.6	19.1
	乾燥密度 (g/cm ³)	1.913	1.758	1.773
	CBR※1 (%)	49.6	42.5	22.2

※1：試験後の凍上面で測定

凍上率は7~9%であるが、路盤材が有する間隙率は23~30%であり、そのうち水分が占める体積は15~18%であることから、凍上率に相当する体積増加分は、路盤材の間隙で吸収できる計算である。したがって、水分が他から補給されて間隙が飽和されるようなケースでない限り、碎石微粉末混合路盤材の凍上は回避できると考えられる。しかし、凍上が懸念される地域での適用にあたっては、地下水位等について十分配慮することが必要であると考えられる。

(5) 耐久性状調査のまとめ

碎石微粉末混合路盤材の水の影響に関わる耐久性の調査を検討した結果、以下のことが確認された

- ①長期強度は、水浸状態であっても増加する傾向にある。
- ②水存在下においては繰返し荷重により、こね返しが起り支持力が低下する。
- ④凍結様式が2程度の凍上が起る。

(日本道路公団規格 JHS 112-1992)

5. まとめ

碎石微粉末を石灰処理し、路盤材に混合した路盤材は、細粒分の増加によるP Iの増加、条件によっては、コネ返しによる支持力低下または凍上性がある材料であることが分かった。しかし、碎石微粉末を混合することで、支持力は増強され、長期的にもその支持力は増加する傾向があることから、新しい路盤材として期待できると考えられる。

あとがき

本委員会は、天然砂にかわる碎石のアスファルト用骨材の安定供給の一環として、碎石微粉末の有効利用について検討してきた。

現在は、本研究成果を基に碎石微粉末混合路盤材を「水硬性複合路盤材」と命名して、材料規格、製造マニュアル、配合方法として取り纏め、関係者に配布している。

今後は、これらの資料により各発注機関・道路業界へのPR活動および水硬性複合路盤材が全国で利

用できるよう(社)日本碎石協会に推進委員会(委員長小川会長)を設け活動中である。

本委員会にご協力頂きました、大阪市立大学 山田 優委員長はじめ、大学・建設省・東京都・道路業界の方々に深く感謝いたします。特に委員会の編成や規格作成に中心となって多大なご尽力を頂きました、建設省土木研究所 故 池田 拓哉幹事長には深く感謝するとともに、ご冥福を祈ります。また、本委員会と並行して進めている通産省補助事業からは試験施工などの貴重な資料を得ることできた。尚、現在試験施工現場における追跡調査(一年計画)も終わりデータの解析、報告書を取り纏め中であり、後日発表する予定である。この補助事業へ参画していただいた日本大学 三浦・轟教授ならびに研究の機会を与えていただいた通産省資源エネルギー庁鉱業課に厚く感謝の意を表します。

(2000年3月18日受付 2000年5月12日受理)