

論文 石材研磨粉のコンクリート用混和材としての利用に関する研究

沼尾達弥¹⁾・福沢公夫²⁾

要旨：近年、石材業においては、その採掘と製造加工の段階で排出される石材廃棄物処理対策は、最大の課題であり、この解決は焦眉の急務となっている。特に、「汚泥」に分類され管理型廃棄物として処理されなければならない石材研磨粉については、その対策が強く求められている。本研究では、石材加工業から排出される石材研磨粉のコンクリート用混和材として利用の可能性について実験的検討を行った。その結果、石材研磨粉の添加によるコンクリートの性質の改善効果が分かり、その特性に応じて、コンクリート用混和材として使用できる可能性が示された。

キーワード：石材研磨粉，コンクリート用混和材，養生方法，フロー，圧縮強度

1. はじめに

近年、石材業においては、その採掘と製造加工の段階で排出される石材廃棄物処理対策は最大の課題であり、この解決は焦眉の急務となっている。

石材廃棄物は、①山から原石を採掘する際に、風化の度合や色調、ひび割れなどによって排出される原石端材、②加工時に切削等により排出する小破石（以下石材コップ）、そして③加工時に研磨および切削により排出する石材スラッジ（以下石材研磨粉）の3つに大別される。

茨城県西部（真壁・大和・稲田・岩瀬地区等）は、全国的に知られた石材産業が盛んな地域である。真壁・大和両地区を例にとると、平成9年度の調査によれば、採石場における原石端材の排出量は88,400トン/年、石材コップは28,700トン/年、石材研磨粉の発生量は13,100トン/年となっている。また、その処理に要する費用は、毎年1億1百万円にも及んでいる¹⁾。特に、上記石材廃棄物3種類のうち、「汚泥」として管理型廃棄処理が必要な石材研磨粉については、その対策が強く求められている。

石材粉をコンクリートへ混入した場合の影響については基礎的な研究²⁾から実用例³⁾等多く報告されている。しかし、そのほとんどが採石を破碎し骨材として粒度調整した後の微粒分が対象であり、排出過程や粒度分布の異なる石材加工業者からの石材粉について報告されたものはないのが現状である。

本研究では、石材加工業から排出される石材研磨粉のコンクリート用混和材として利用の可能性について実験的検討を行った。

2. 実験に用いた石材研磨粉の特性

石材研磨粉は、研磨および切削工程時に排出される工水中のSS（浮遊生物質濃度）成分をろ過、普通沈殿、もしくは無機凝集剤であるポリ塩化アルミニウム（以下PAC）や高分子系の無害な凝集剤を用いて沈殿したものをフィルタープレスにより脱水処理したものを言う。

一般的に、切削加工時に使用するダイヤモンド砥石の砥粒は#40程度ある。一方、研磨で使用される工具の砥粒は#3,000～#8,000と極めて小さい。したがって切削加工と研磨加工で排出される石材研磨粉の大きさは異なるはず

*1 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博（正会員）

*2 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 工博（正会員）

であるが、石材研磨粉としては、これら2種類の石材研磨粉が混合して排出されて処理されていることから、区別せずに混合物としてその性状を評価した。尚、本研究では、茨城県西部の石材団地で採集された石材研磨粉を用いた。

図-1は石材研磨粉の粒度分布を表す。最大59 μm から1 μm まで幅広く分布しており、平均粒子径は約10 μm となり、砕石粉よりもより細かな粒子となっている。また絶乾密度は2.56(g/cm³)でる。

表-1は、ガラスビード法(四ほう酸リウム：試料=10:1)による蛍光X線分析法を用いた石材研磨粉の化学成分分析結果である。尚、石材研磨粉を110 $^{\circ}\text{C}$ で24時間乾燥後、瑪瑙乳鉢で粉碎し試料とした。

その結果、SiO₂の含有量が最も多く、次にAl₂O₃が多く含有されている。SiO₂は石英、長石、黒雲母を構成する成分であり、Al₂O₃は長石、黒雲母を構成する成分である。また、Na₂Oが3.13%、K₂Oが3.04%と多く含まれている。NaあるいはKは長石に含まれていると考えられ、安定しているためアルカリ骨材反応は起こさないと考えられる。

本研究では、茨城県西部の石材団地でフィルタープレスを行って採取された石材研磨粉を、110 $^{\circ}\text{C}$ の電気炉に入れて24時間乾燥させ0.3mmのフルイに通過したものを使用した。

3. 凝集剤の影響確認実験

石材研磨粉の処理過程では、前述の様に沈殿を促進するために、PACや高分子系の凝集剤が使用されている。石材研磨粉をコンクリートの混和材として使用する場合、凝集剤の影響が懸念される。

ここでは、茨城県の石材業者で多く用いられている凝集剤として有機高分子凝集剤(ポリアクリル酸エステル・強カチオン系)を取り上げ、セメントの硬化性状に及ぼす影響について実験を行った。

3.1 実験方法

凝集剤を0, 1, 10, 100, 1000 ppmと濃度を5種類に変えて溶かした水を練り混ぜ水として使用した場合について、凝結試験(JIS R 5201)、および水セメント比30及び60%のモルタルを用いて、標準養生後に圧縮強度試験を行った。尚、使用材料等は4章に示すとおりである。

3.2 実験結果と考察

図-2に、凝集剤濃度とペーストの始発および終結時間の関係を示す。また、図-3には、同様に各水セメント比のモルタルの圧縮強度試験結果を示している。

これらの図から、凝集剤がセメントの硬化性状に及ぼす影響はみられない。通常使用される凝集剤の濃度は1~2 ppm程度であることも考慮すると、ここで取り上げた凝集剤添加の影響はないと判断できる。また、コンクリートス

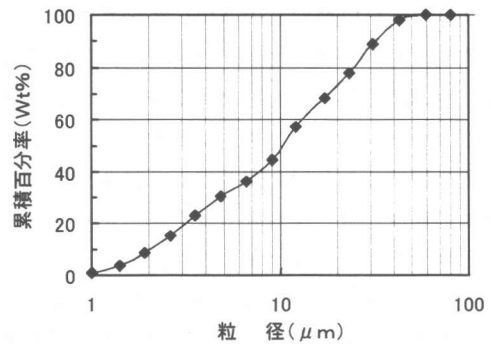


図-1 石材研磨粉の粒径分布

表-1 石材研磨粉の元素組成分析値 (wt/%)

試料	Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TOTAL
研磨粉	0.7	68.17	14.23	4.13	0.42	----	3.95	1.68	3.04	3.13	0.11	95.94

ラッジを対象に、無機系凝集剤が添加された水を使用した場合の報告でも、凝集剤の影響は無いとの報告⁴⁾もある。しかし、凝集剤の種類は多く、使用凝集剤毎に調査する必要がある。

4. 石材研磨粉をコンクリート用混和材として用いた場合の圧縮強度試験

石材研磨粉をコンクリート用混和材として使用した場合のモルタルの圧縮強度を検討するため以下の3つの実験を行った。

- ・実験1：石材研磨粉をセメントの内割り混入したモルタルの試験
- ・実験2：石材研磨粉を細骨材の内割り混入したモルタルの圧縮強度試験
- ・実験3：石材研磨粉を細骨材の内割り混入によるブリージング試験

4. 1 試験方法

(1) 使用材料

本実験に使用した材料は、セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 = 3.15g/cm³)、細骨材として、鬼怒川産川砂(表乾密度 = 2.60g/cm³)および混合砂(鬼怒川産天然砂:7, 岩瀬産砕砂:3, 表乾密度 = 2.56g/cm³)を用いた。また混和剤は、超高強度コンクリート用高性能減水剤とした。

(2) 配合と供試体および実験手順

実験1は水セメント比を25%、40%、

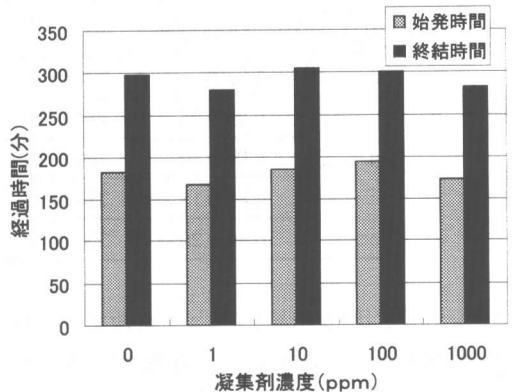


図-2 凝集剤濃度と凝結試験結果

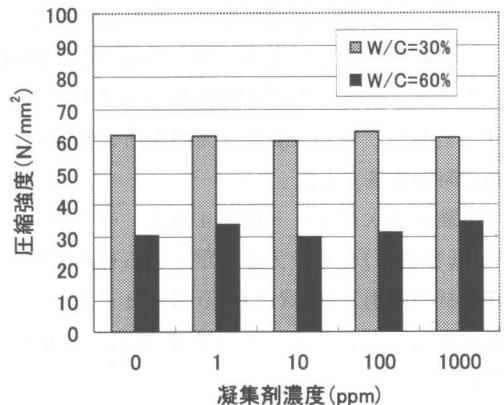


図-3 凝集剤濃度と圧縮試験結果

表-2 モルタルの配合(実験1)(単位:g)

W/C	セメント:研磨粉	セメント	研磨粉	細骨材	W	混和剤
25%	1.00:0	832.1	0	1352.4	203.3	6.66
	0.95:0.05	790.5	33.8	1352.4	203.3	6.66
	0.90:0.10	748.9	67.6	1352.4	203.3	6.66
	0.85:0.15	707.3	101.4	1352.4	203.3	6.66
	0.80:0.20	665.7	135.2	1352.4	203.3	6.66
40%	1.00:0	740.0	0	1202.7	296.0	-----
	0.95:0.05	702.5	30.7	1202.7	296.0	-----
	0.90:0.10	667.8	58.9	1202.7	296.0	-----
	0.85:0.15	630.0	89.6	1202.7	296.0	-----
	0.80:0.20	592.2	120.3	1202.7	296.0	-----

表-3 モルタルの配合（実験2）（単位：g）

W/C	細骨材:研磨粉	セメント	研磨粉	細骨材	W	混和剤
40%	1.00:0	734.0	0	1202.7	296.0	-----
	0.95:0.05	734.0	60.2	1160.4	296.0	-----
	0.90:0.10	734.0	120.3	1082.4	296.0	-----
	0.85:0.15	734.0	180.5	1021.4	296.0	-----
	0.80:0.20	734.0	240.6	962.0	296.0	-----

セメント骨材比(容積比)を1:2に設定し、石材研磨粉をセメントの内割り(容積比)で0%~20%まで変化させた。この配合を表-2に示す。尚、水セメント比の計算には混和剤の70%が水であるとして計算した。

また、本実験では、フロー試験及び凝結試験も同時に行った。凝結試験は、石材研磨粉をセメントの内割りとして0~20%添加した場合について、それぞれ標準軟度のペーストをつくり、室温20℃、湿度85%の場所に静置し、凝結時間を測定した。

実験2は水セメント比を40%、セメント骨材比(容積比)を1:2に設定し、石材研磨粉を細骨材の内割り(容積比)で0%~20%まで変化させた。この実験のモルタルの配合を表-3に示す。

尚、実験1,2共に、供試体はΦ50mmH×100mmとして、水中養生及びオートクレープ養生を行った。

水中養生の場合は、打込み後に24時間で脱型し、20±3℃の恒温水槽で材齢28日まで養生を行い、水中から取り出して直ちに試験を行った。また、オートクレープ養生の場合は、打込み後24時間で脱型して、4~10日間気中に静置し、その後、最高温度180℃、保持時間3時間のオートクレープ養生を行い、養生後1週間以内に圧縮試験を行った。

実験3は水セメント比60%のモルタルを用いて、細骨材の内割りで0%,20%を石材研磨粉で置換した場合のブリージングを比較した。ブリージング量は、Φ50mmH×100mmの型枠に打ち込んでからの経過時間と表面に分

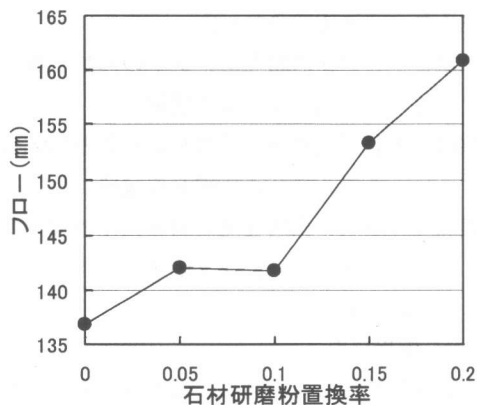


図-4 石材研磨粉置換率とフロー試験結果(セメントの内割り置換)

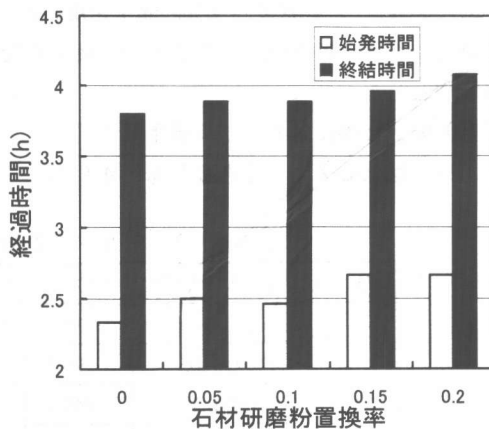


図-5 石材研磨粉置換率と始発・終結時間(セメントの内割り置換)

離した水分を濾紙で吸い取った水量によって整理した。

4.2 実験結果および考察

(1) 石材研磨粉をセメント内割りとして用いたモルタルの流動性、凝結時間および圧縮強度

① 石材研磨粉置換率とフレッシュモルタルの流動性の関係

図-4 に石材研磨粉置換率とフレッシュモルタルのフローの関係を示す。この結果から石材研磨粉の置換率が高くなるにつれフレッシュモルタルの流動性が高くなると言える。石材研磨粉の平均粒子径が $10\ \mu\text{m}$ であるのに対し、セメントの平均粒子径の方が大きいにも関わらず、流動性が高くなるのは粒径以外の石材研磨粉の形状などの他の要因が関係していると考えられるが、本研究においては原因が明らかにならなかったため、今後の課題となる。

② 石材研磨粉置換率と凝結時間の関係

図-5 には、石材研磨粉置換率と始発・終結時間の結果を示す。この結果から石材研磨粉をセメントの内割りとして混入した場合、ペーストの凝結時間は始発時間、終結時間共に徐々に遅くなる傾向が示された。しかし、この程度の遅れはコンクリートを使用する上で問題が生じることはなく、石材研磨粉をコンクリート用材料として使用できるものと考えられる。

③ 石材研磨粉置換率と圧縮強度の関係

図-6 に石材研磨粉置換率と圧縮強度の関係を示す。また、図-7 に、置換率 0% のときの圧縮強度を 1 とするときの圧縮強度比で表した結果を示す。石材研磨粉の置換率が高くなるにつれモルタルの圧縮強度が低下することが分かる。W/C=25% の場合の圧縮強度は養生の違いに関係なく徐々に低下する。一方、W/C=40% のモルタルの圧縮強度は、オートクレーブ養生の場合は置換率 10% まで変化せず、その後急激に低下する。水中養生では石材研磨粉を混入すると直ちに圧縮強度が低下していく。このようにオートクレーブ養生の場合には石材研磨粉を混入したことによりシリカ分が加えられ、水和反応を起こし安定したトベルモライトの結晶を形成したことに起因すると考えられる。

(2) 石材研磨粉の細骨材内割り置換率と圧縮強度の関係

図-8 に石材研磨粉を細骨材として置換する

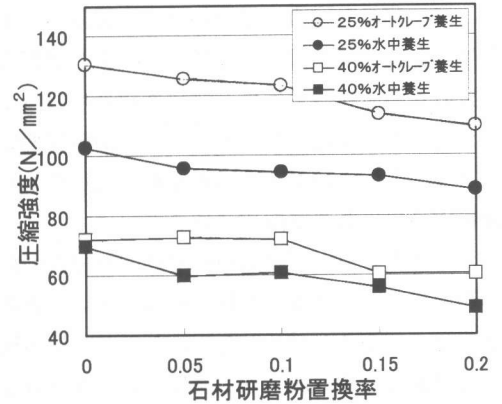


図-6 石材研磨粉置換率と圧縮強度 (セメントの内割り置換)

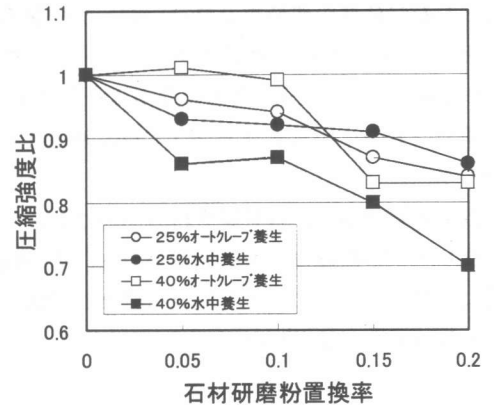


図-7 石材研磨粉置換率と圧縮強度比 (セメントの内割り置換)

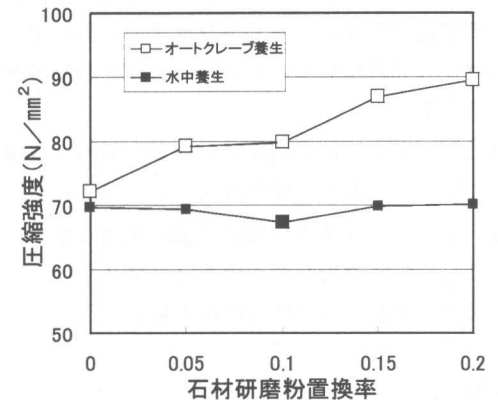


図-8 石材研磨粉置換率と圧縮強度 (細骨材の内割り置換)

場合の石材研磨粉置換率と圧縮強度の関係を示す。この図より、水中養生の場合は置換率により圧縮強度の変化はない。このことより貧配合の分離を防止する目的で石材研磨粉を用いることができるものと思われる。また、即時脱型コンクリートにおいても石材研磨粉の添加により成形性の向上などが期待できる。

オートクレープ養生については、石材研磨粉の添加率が高くなるにつれ、モルタルの圧縮強度が高くなるのが分かる。これは、前述の様に石材研磨粉を添加したことによりシリカ分が加えられセメント中の石灰(CaO)と水反応によりトベルモライトの安定した結晶を形成することに起因すると考えられる。

(3) 石材研磨粉置換率とブリージングの関係

図-9に打設からの経過時間とブリージング量の関係を示す。石材研磨粉置換率20%では、無添加のものに比べブリージングが改善されることが示されている。

以上の結果から、石材研磨粉の添加によるコンクリートの性質の改善効果が分かり、その特性に応じて、コンクリート用混和材として使用できる可能性が示された。

5. 結論

(1) 石材研磨粉をセメントの内割りとして用いる場合には、置換率の増加とともに強度が減少する。ただし、オートクレープ養生の場合はその割合が小さい。水セメント比の大きい配合では10%置換してもしないのと同等の強度が得られる。

(2) 石材研磨粉を細骨材の内割りで用いる場合には、水中養生の場合は強度の低下はなく、オートクレープ養生の場合は強度が高くなる。

(3) 石材研磨粉を混入すると、ブリージングが減り、貧配合の分離抵抗性を高める。

謝辞

本研究は、真壁石材協同組合及び茨城県工業技術センター窯業指導所との共同研究により行

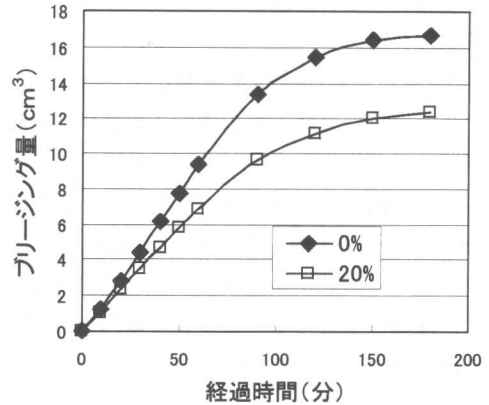


図-9 経過時間とブリージング量の結果
(細骨材の内割り置換)

った。組合関係者並びに窯業指導所小島氏には、試料の提供や実験データを提供いただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 真壁石材協同組合：平成9年度活路開拓ビジョン調査事業報告書(石材廃棄物の再資源化と用途開発)1999.3.
- 2) 例えば、大橋正治、田村博、谷川恭雄：コンクリート用混和材としての砕石粉の有効利用に関する研究、日本建築学科構造系論文集、No.532, pp.7-11,2000.6.
- 3) 例えば、永嶺久一、笹原厚：石粉を使用した高流動コンクリートのCFT工事への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1,pp.505-506,1999.9
- 4) 竹田吉紹、他5名：コンクリートスラッジにおけるリサイクルシステムの構築に関する研究(その2.無機系凝集剤を使用した処理水を用いたセメントペースト供試体の力学特性)、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp.281-282,1999.9.