

ゼロエミッション型砕石処理技術の開発

木村 邦夫

(元)産業技術総合研究所, 841-0081 佐賀県鳥栖市萱方町 218-34

1. はじめに

土木・建築用砕石は、採掘・破碎・ふるい分けの工程で生産されている。粒径 5mm 以上のものが砕石として出荷されるが、それ以下のものは「石粉」として出荷している事業所もあるが、砕石出荷量に比べ少なく、余剰な石粉は採掘現場に埋め戻すか、堆積させたままであり、環境問題となっている。

そこで、この余剰な石粉を原料にした低コスト、且つ高品質の人工砕石・人工軽石の開発を行い、ゼロエミッション型砕石処理技術を開発することを目指し、産業技術総合研究所の地域中小企業支援型研究開発制度の下、平成 17 年度に(株)大坪砕石と共同研究を行った。なお、この共同研究においては、石粉以外にリサイクルプラントの改良土、廃コンクリート微粉、微砂排泥等も提供され、実験を行った。

ここでは、余剰な石粉を原料にした低コスト、且つ高品質の人工砕石の開発について紹介する。

2 試料とその物性

共同研究企業から、立花砕石場の石粉(以下、立花石粉と略称)、山川採石場の石粉(以下、山川石粉と略称)が提供された。

人工砕石を開発するための基礎物性として、粉末X線回折装置による鉱物組成の定性分析、熱重量測定装置による加熱減量微分値(DTG)の測定を行った。測定結果を図1および図2に、化学組成分析結果を表1に示す。なお、図1中の記号は、V:蛭石、M:雲母、A:角閃石、S:蛇紋岩、C

:粘土鉱物、Q:石英、F:長石、L:石灰石である。

図1によると、立花石粉は角閃石と蛇紋岩を主成分とし、蛭石と石英も含まれている。山川石粉の鉱物組成は、石英、長石、蛇紋岩、雲母、蛭石である。図2における600℃付近の脱水カーブは、角閃石と蛇紋岩の結晶水の脱水によるものと推察される。矢野微砂は、風化花崗岩を原料としていると思われる、石英、長石、粘土鉱物、雲母、蛭石が含まれている。また、図2における800℃付近の脱水カーブは、石灰石の脱炭酸によるものと推察される。

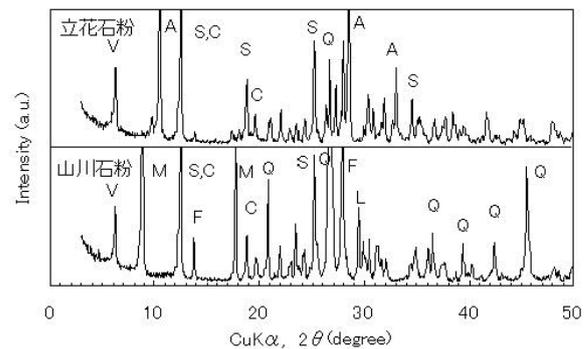


図1 粉末X線回折装置による鉱物組成

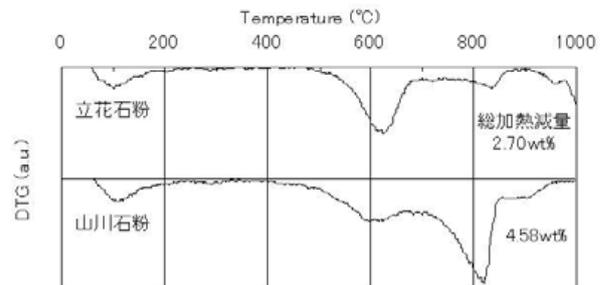


図2 加熱減量微分値(DTG)の測定

表1 化学組成分析結果 (wt%)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss	Total
立花石粉	49.0	0.42	8.86	10.7	13.8	10.6	1.31	0.12	2.7	97.31
山川石粉	59.1	0.69	16.5	5.61	2.24	2.20	2.65	4.20	4.7	97.69

3. 実験方法

低コストバインダーとして、普通ポルトランドセメント(以下、セメントと略称)を選択し、また、マグネシア系バインダー(以下、マグ系と略称)も併用した固化実験を行った。通常のセメント固化では、骨材：セメントの重量比は 70：30 が用いられる。ここでは、低コストを意識し、1.2mm以下の石粉とバインダーの混合重量割合を 90：10～70：30 とした。両者を混合後、水を加えて、加圧成形圧 10MPa で外径約 20mm、高さ 15～20mm の円柱状の試料(1条件3個)を作製した。添加した水の量は、上記加圧成型時に、水が分離する限度に近い値とした。この値は、試料の吸水率、粒度分布等で異なる。立花石粉、山川石粉では外割 12wt%であった。成形後の養生は、80℃蒸気養生半日、80℃水中養生1日を基本とした。

養生後の試料物性として、圧縮強度、吸水率、表乾比重を測定した。その後、試料を粉碎し、粉末X線回折、熱重量測定を行い、反応生成物等の変化を検討した。また、強度試験後の破碎試料 10g を 60℃、100ml の蒸留水中に1日保持後の溶液の pH を測定した。

4. 実験結果

共同研究企業から提供された碎石の規格値(表2)を基に、以後の固化製品の目標物性として、圧縮強度 20MPa 以上、吸水率 15%未満、見掛密度 2.0g/cm²(下記表乾比重 2.0)以上を設定した。

表2 碎石の規格値

種類	圧縮強度 (MPa)	吸水率 (wt%)	見掛密度 (g/cm ²)
硬石	500(49.03MPa)以上	5未満	2.5以上
準硬石	100(9.81MPa)～500(49.03MPa)	5～15	2.0～2.5
軟石	100(9.81MPa)未満	15以上	2.0未満

配合比による圧縮強度の変化を図3に、吸水率の変化を図4に、表乾比重の変化を図5に、pHの変化を図6に示す。なお、図中記載の配合比は、試料：セメント：マグ系の重量比である。

マグ系を用いた場合、同量のセメントに比べ、試料の圧縮強度は劣る(90：0：10)。しかし、バインダー量が 10wt%の場合、セメントとマグ系を混合して使用することにより、同量のセメント添加した場合に比べ圧縮強度値が 19～33%上昇することが明らかになった(90：5：5)。

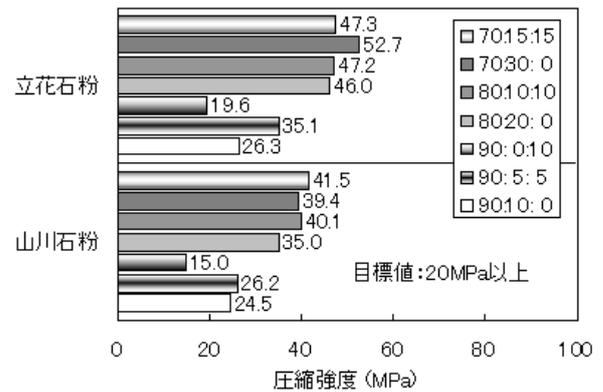


図3 配合比による圧縮強度の変化

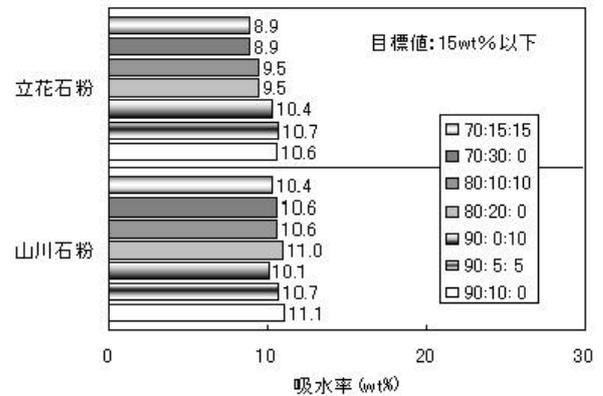


図4 配合比による吸水率の変化

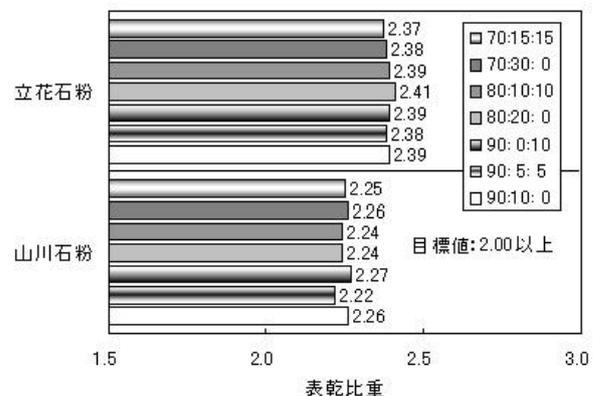


図5 配合比による表乾比重の変化

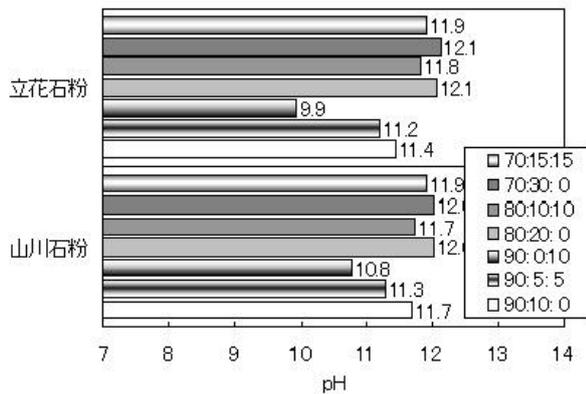


図6 配合比によるpHの変化

また、セメント量を増加させることにより、圧縮強度の増加、吸水率の低下が認められる。マグ系の混用効果は、90：5：5 の場合が顕著に現れているが、70：15：15 では逆に強度の低下が認められる。

図5に示した表乾比重は全ての配合で目標値以上の値を示している。

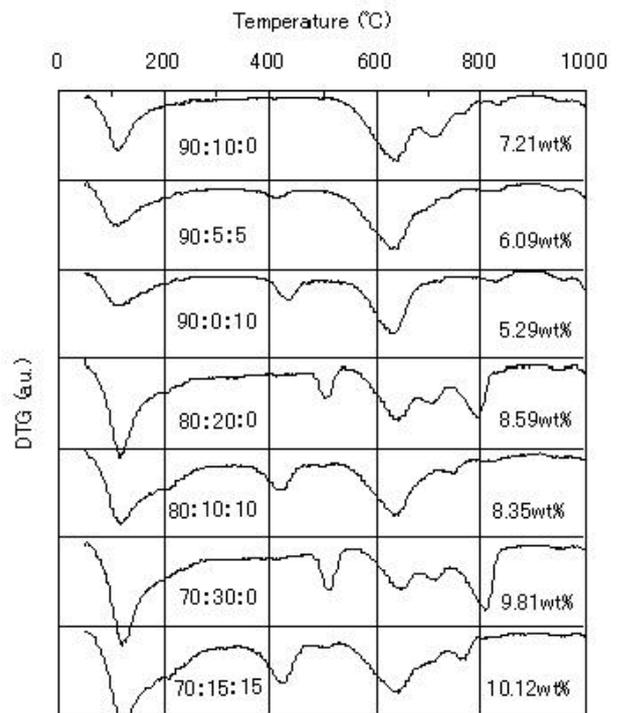
図6によると、マグ系を用いた場合、同量のセメントを用いた場合比べ、pHの低下が著しい(90：0：10)。セメントとマグ系を混合して使用した場合、何れのバインダー量においても、pHの低下が認められる。

上記物性測定後の試料を粉碎し、粉末X線回折測定を行い、反応生成物の変化を検討した。しかし、何れの結果においても、若干の差異は認められたが、明確な差異を見いだすことは困難であった(測定結果は省略)。

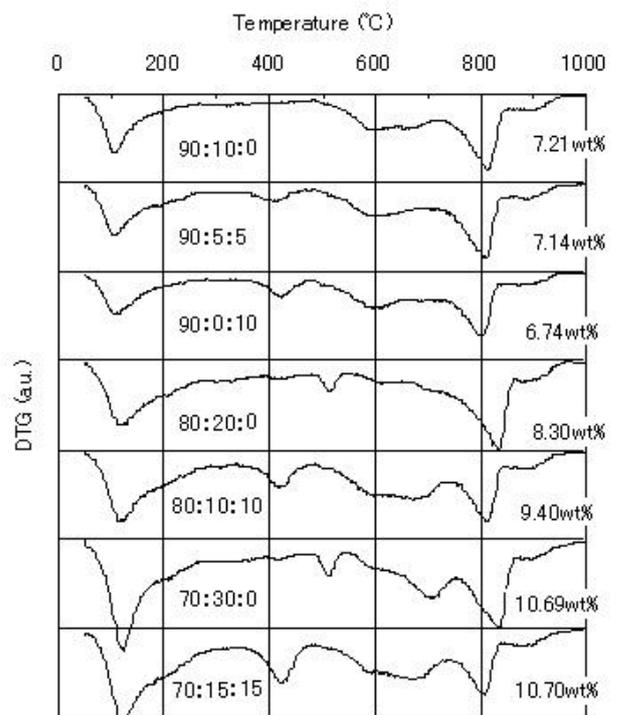
同試料を用いて測定した熱重量測定結果を図7に示す。この場合は、差異が認められる。マグ系を添加した場合、400～500℃に珪酸マグネシウム水和物と思われる脱水ピークが認められる。

マグ系の価格はセメントの約6倍である。コストを低く抑さえるため、バインダーの総量を10wt%以下とし、マグ系の混合比を変化させた実験を行った。

結果を図8～図11に示す。石粉 92.5wt%，セメント 5wt%，マグ系 2.5wt%の配合比(92.5：5.0：2.5)が、目標物性をクリアしている。また、マ



立花石粉



山川石粉

図7 熱重量測定結果

グ系量も少なく、コストも抑えら、製品の pH もセメントだけを用いたよりも低い。これらのことから、この混合比が最適混合比と判断される。

上記物性測定後の試料を粉碎し、粉末X線回折

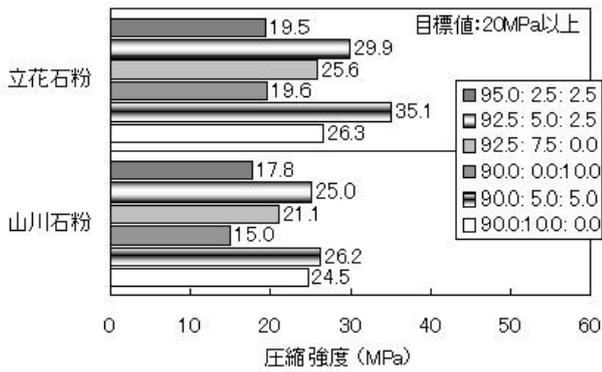


図8 配合比による圧縮強度の変化

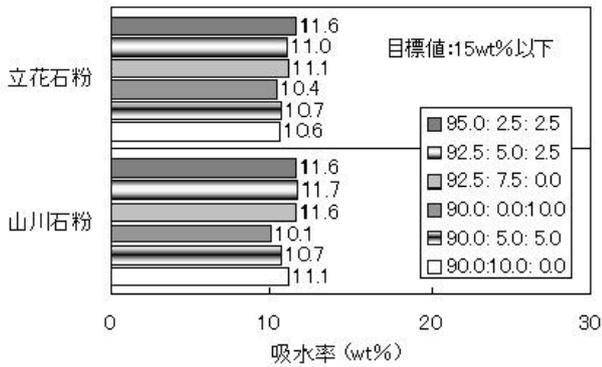


図9 配合比による吸水率の変化

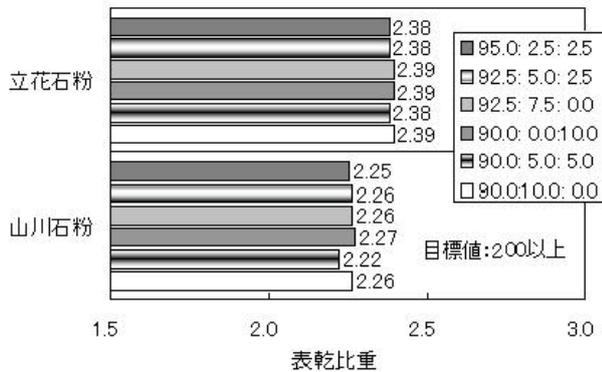


図10 配合比による表乾比重の変化

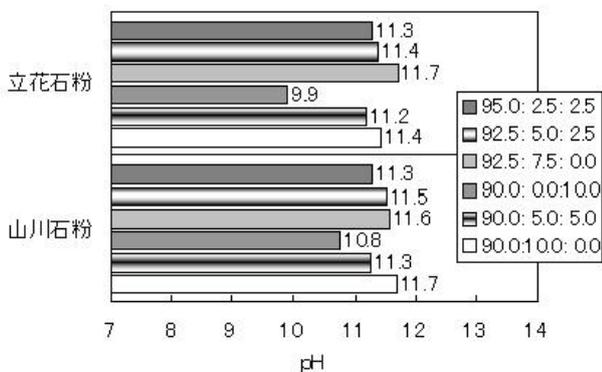


図11 配合比によるpHの変化

測定と熱重量測定を行い、反応生成物の変化を検討した。しかし、粉末X線回折では、明確な差異を見いだすことは困難であった。また、熱重量測定では、図7と同様に、マグ系を添加した場合、400～500℃に珪酸マグネシウム水和物と思われる脱水ピークが認められ、マグ系の添加量の減少と共に400～500℃の珪酸マグネシウム水和物と思われる脱水ピークが小さくなっているのが確認できた。

マグ系の代わりに、火山ガラス微粉(丸中白土(株)製シルトF)を用いた実験も行った。結果を表3に示す。配合は、石粉90wt%、セメント5wt%、火山ガラス微粉5wt%である。立花石粉と山川石粉で目標値を達成し、pHも低い。

表3 火山ガラス微粉用いた実験結果

種類	圧縮強度 (MPa)	吸水率 (wt%)	表乾比重 (—)	pH (—)
立花石粉	25.80	10.5	2.37	10.8
山川石粉	20.01	11.0	2.21	10.9

ここで、成形法の1手段として、パン型造粒機を用いた転動造粒を試みた。

パンのサイズは、内径240mm、高さ70mmである。運転条件は回転数40rpm、角度60°とした。石粉92.5wt%、セメント5wt%、マグ系2.5wt%、水(外割15wt%)の配合割合とした。

乾式混合、水添加混合の後、造粒機に投入し、平均粒径約10mmの試料を得た。3項に示した養生後、各種物性を測定した。表4に造粒法による試料の物性を示す。なお、強度は圧壊強度値である。圧壊強度は、球状の粒を上下から加圧し、破壊時の荷重を球の投影面積で除した値とした。

表4 転動造粒成形品の物性

種類	強度 (MPa)	吸水率 (wt%)	表乾比重 (—)	pH (—)
立花石粉	1.90	11.5	2.47	11.4
山川石粉	2.46	12.8	2.28	11.5

なお、立花岩石の圧縮強度(円柱状試料を上下加圧)は 109.4MPa、圧壊強度(円柱状試料を横に寝かせ、上下加圧)は 22.2MPa、山川岩石の圧縮強度は 73.5MPa、圧壊強度は 15.0MPa であった。

これらのことから、表 4 に示した強度値の 4.9 倍の値が圧縮強度値に対応すると推察され、立花石粉は 9.31MPa、山川石粉は 12.05MPa の圧縮強度値の推定値が得られる。この値は加圧成形による圧縮強度値(図 5 に示した立花石粉：29.9MPa、山川石粉：25.0MPa)値の 1/3 ～ 1/2 であり、転動造粒法では高強度の成形体を得難いことを示している。

5. まとめ

- 1) マグ系を用いた場合、同量のセメントを用いた場合比べ、試料の圧縮強度は劣るが、バインダー量が 10wt%の場合、セメントとマグ系を混合して使用(石粉：セメント：マグ系= 90：5：5)することにより、圧縮強度値が 19 ～ 33%上昇する。
- 2) セメントとマグ系を混合して使用した場合、何れのバインダー量においても、pH の低下が認められる。
- 3) マグ系の価格はセメントの約 6 倍である。コストを低く押さえるため、マグ系の混合比を変化させた実験を行った結果、石粉 92.5wt%、セメント 5wt%、マグネシア系バインダー 2.5wt% が、目標物性をクリアーした。マグネシア系バインダーの量も少なく、コストも抑えられ、製品の pH もセメントだけを用いたよりも低い。これらのことから、上記の混合比が最適と判断した。
- 4) 火山ガラス微粉を用いた実験では、石粉

90wt%、セメント 5wt%、火山ガラス微粉 5wt% の条件で、目標値を達成し、pH も低い製品が得られた。

- 5) 転動造粒法で得られた試料の圧縮強度の推定値は、10MPa 加圧成形試料の圧縮強度値の 1/3 ～ 1/2 であり、転動造粒法では高強度の成形体を得難いことが明らかになった。

6. おわりに

ここで開発した人工碎石の用途の 1 つとして、道路建設で用いられてる上層路盤あるいは下層路盤用の路盤材が考えられる。この場合、修正 CBR、密度、含水比等の値をクリアーする必要がある。

本報告の結果は、いずれも実験室規模の結果である。今後は、パイロットプラントを用いた実証試験研究を行い、最終的に生産プラントを構築することが必要である。

既存製品に対しての物性的な優位性は今後の実証試験を待たなければならないが、廃棄コストが不用になり、有価物として出荷できるため、価格に関しての優位性はあると思われる。また、業界にとって、いわゆるダストとしての「石粉等」を再利用することにより、作業環境の劣悪化・近隣住民の環境汚染等を防げるのみでなく、枯渇しつつある資源の有効利用となり、かつ、当業界の新規市場開発にも貢献することとなる。

現在、これまでの結果を踏まえ、人工碎石の製造工程に適した混合方法、成形方法、養生方法等を共同研究企業と連携しながら検討している。

本技術を共同研究企業を通して、(社)日本碎石協会の会員に紹介することにより、ゼロエミッション型碎石処理技術が広まることを期待している。