

石灰水洗スラッジを添加した水砕スラグの地盤工学的特性の評価

Geotechnical Characteristics of Admixture Based on Granulated Blast Furnace Slag and Raw-lime Washing Sludge

竹 下 祐 二 (たけした ゆうじ)
岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科

田 村 二 郎 (たむら じろう)
岡山県石灰工業協同組合

成 田 豊 (なりた ゆたか)
岡山県石灰工業協同組合

塩 尻 大 輔 (しおじり だいすけ)
(株)フジタ

河 野 伊一郎 (こうの いいちろう)
岡山大学 学長

1. はじめに

近年、建設工事に必要とされる良質の天然材料は、需要の増大や環境保全等の問題のために、入手することが困難になってきている。そのため、産業副産物を有効に利用して、天然材料に変わりうる新しい地盤材料の開発を行うことは重要な課題と言える。我が国の産業副産物のうち、石灰産業において石灰石を水洗する過程で発生する石灰水洗スラッジ、および鉄鋼生産の過程で副生される高炉水砕スラグ（以後、水砕スラグと記す）は、ともに発生場所が限定されているものの、有害物質を含まず、その産出量および品質が比較的安定しているため、地盤材料として有効利用できる可能性を有している。

石灰水洗スラッジは発生時の含水比が非常に高く、取扱いが容易ではないことから、その大部分が埋立て廃棄処分されている現状にある。一方、水砕スラグはセメント用材料を主体として有効利用が図られ、天然砂に比べて軽量で内部摩擦角が大きく、潜在水硬性によって時間経過とともに固結安定する特異な材料であることから、地盤材料としての利用が期待される¹⁾。しかし、水砕スラグを早期に硬化させ、十分な強度を得るためには、石灰などのアルカリ刺激剤を添加し、強アルカリ状態を維持する必要性が指摘されており²⁾、そのアルカリ刺激剤の種類やその添加量等が水砕スラグの硬化速度や強度発現に及ぼす影響についての評価方法は確立されていない。

本文では、これらの産業副産物を地盤材料として有効に利用することを目的として、水砕スラグに石灰水洗スラッジを添加した人工混合材料について、その物理的特性および力学的特性を測定した結果について述べる。また、実施工への適用性を検討するために、下層路盤材と

しての有用性を検証した結果についても報告する。

2. 石灰水洗スラッジと水砕スラグによる混合材料

石灰水洗スラッジは石灰石の洗浄水を沈殿・過した際に発生する粘土状の物質であり、我が国における排出量は石灰生産量の約5%に相当する年間350万tと推定されている³⁾。石灰水洗スラッジは石灰石粉を主成分とする物理化学的性質の比較的均質な材料であり、有害な成分を含有していない産業副産物である。しかし、発生時点での含水比は24~30%程度と高い上に、放置された場合、自然乾燥によって表面が固化し、粉砕が困難な状態となる等、その利用は容易ではない。したがって、石灰水洗スラッジを有効利用するためには、取扱い、貯蔵、運搬の容易な粉体に加工することが不可欠である。

本研究では石灰水洗スラッジに湿潤重量比20%の生石灰を添加して、強制攪拌翼付きドラム型反応機（ドラム内径96 cm、ドラム長さ305 cm、処理能力2 m³/h）により攪拌し、生石灰の水和反応により含水比を1~2%に低減させた粉体状に加工する方法を開発した。以後、本文中における石灰水洗スラッジとは、この粉体加工を行ったものを意味する。本研究で用いた石灰水洗スラッジは、岡山県石灰工業協同組合加盟企業にて副産されたものであり、その物理化学的性質を表-1に示す。

水砕スラグは鉄の製造過程において、溶鉱炉から生成された熔融状態の高炉スラグを圧力水で急冷粒状化したものであり、その産出量は鉄鉄の生産量の約25%程度と推定されている⁴⁾。水砕スラグは一定の製法により工場生産された産業副産物であるため、その主成分や物理化学的性質および粒子形状は比較的均一である²⁾。本研

表-1 石灰水洗スラッジの物理化学的的特性値

	含 水 比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	密 度 (g/cm ³)	化 学 組 成 (%)						pH
					CaCO ₃	Ca(OH) ₂	SiO ₂	MgCO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
発生時	24~29	23.40	20.75	2.71	96.25	0.0	2.80	0.63	0.20	0.10	8~9
粉体加工後	1~2			2.62	74.68	22.32	2.16	0.59	0.15	0.07	11~12

事例報告

表—2 水砕スラグの化学成分

含水比 (%)	塩基度 (-)	化学組成 (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	その他
10.3	2.05	30.9	12.0	44.7	6.8	0.4	1.0	4.2

表—3 混合材料の配合率 (乾燥重量比)

Type	水砕スラグ	石灰水洗 ケーキ	消石灰 含有率
S	100	0	0
SC-04	96	4	1
SC-08	92	8	2
SC-12	88	12	3

(単位 ; %)

究では、川崎製鉄㈱水島製鉄所にて副産された水砕スラグを用いた。その化学成分を表—2に示す。

石灰水洗スラッジと水砕スラグによる混合材料は、表—3に示す4種類の配合率によって作成し、石灰水洗スラッジ添加による水砕スラグの物性改良効果を検討した。なお、表—3中に示した消石灰含有率とは、前述の石灰水洗スラッジを粉体加工する際に添加された生石灰成分が消石灰として石灰水洗スラッジ内に残留した割合を示したものである。各混合材料は含水比15%にて均一になるように電動ミキサーを用いて練り混ぜた後、78.5 kgの静的荷重（鉛直応力98.1 kPaに相当）を与え、直径10 cm、高さ20 cm、湿潤密度1.20~1.35 g/cm³の力学試験用の供試体を作製し、最大で150日間の室内気中養生（温度13±2℃、湿度65±3%）を行った。

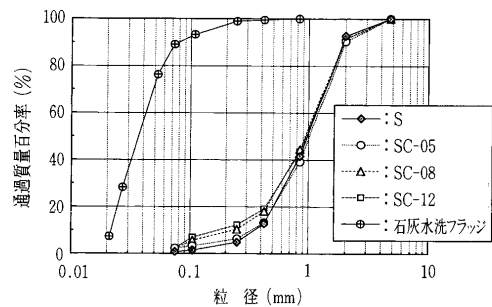
3. 混合材料の物理的および力学的特性

3.1 粒度分布および締固め特性

各混合材料について、密度、粒度分布を測定した結果をそれぞれ図—1、表—4に示す。また、締固め試験（ランマー質量2.5 kg、モールド内径10 cm、1層当たり突固め数25回、湿潤法・非繰返し法）を実施して得られた締固め曲線を図—2に示す。石灰水洗スラッジの添加によって細粒分の含有率が増加するため、粒度特性は水砕スラグ単体の試料に比較して若干向上し、締固めによる乾燥密度も増加する。ただし、締固め曲線においては、明瞭な最適含水比は見いだせず、本混合材料の含水比が締固め度に及ぼす影響は非常に小さいと言える。

3.2 透水性および水分保持特性

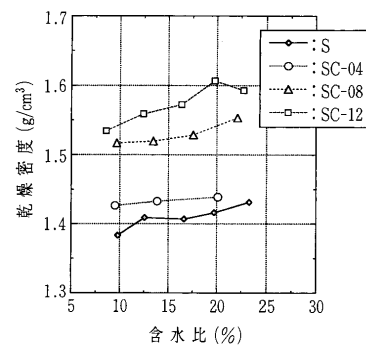
養生日数91日における混合材料の透水係数は $2.8 \times 10^{-1} \sim 3.1 \times 10^{-1}$ cm/s程度と測定された。これは、水砕スラグの代表的な透水係数¹⁾である $10^0 \sim 10^{-1}$ cm/sと同程度であり、石灰水洗スラッジの添加による透水性への影響は認められない。また、図—3は土柱法によるpF試験によって計測された、混合材料の水分特性曲線であり、砂質土に類似した水分保持特性を有している⁵⁾。以上のことから、本混合材料の透水性は地盤材料として非常に良好であると判断できる。



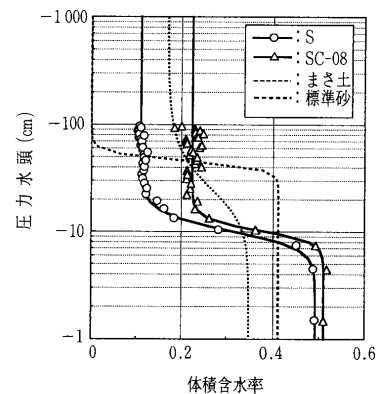
図—1 粒径加積曲線

表—4 密度および粒度試験結果

項目	S	SC-04	SC-08	SC-12
密度 (g/cm ³)	2.74	2.70	2.70	2.69
50%粒径 (mm)	0.98	1.05	0.94	0.96
均等係数	3.29	3.51	5.00	6.94
曲率係数	0.95	1.02	1.29	1.65



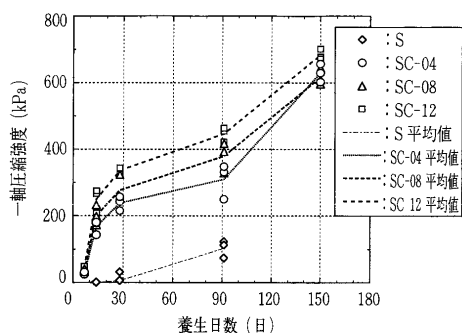
図—2 締固め曲線



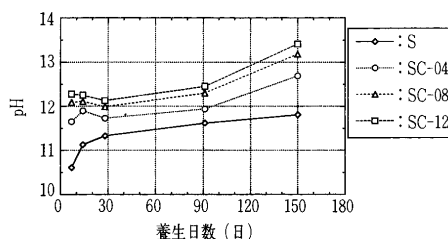
図—3 水分特性曲線

3.3 一軸圧縮強度の経時変化

養生日数14日、19日における一軸圧縮強度の経時変化を図—4に示す。水砕スラグ単体試料では、14日養生では自立こそするものの硬化しているとは言えず、水砕スラグ特有の潜在水硬性が発揮されるまでには、90日程度の養生期間が必要であることがわかる。一方、混合材料では、石灰水洗スラッジの添加量に応じた早期の強度発現が認められ、150日養生後で600~700 kPa程度の一軸圧縮強度が得られた。図—5は各養生日数において、一軸圧縮試験終了時の試料片を用いて測定したpHの平均値である。混合材料のpH値は12~13であり、強アルカリ状態が維持されている。



図—4 一軸圧縮強度の経時変化



図—5 pH 値の経時変化

したがって、石灰水洗スラッジを水砕スラグに添加することにより、水砕スラグの潜在水硬性の発生を助長させるアルカリ刺激効果が期待でき、石灰水洗スラッジの添加量に応じた早期強度が得られることが認められた。

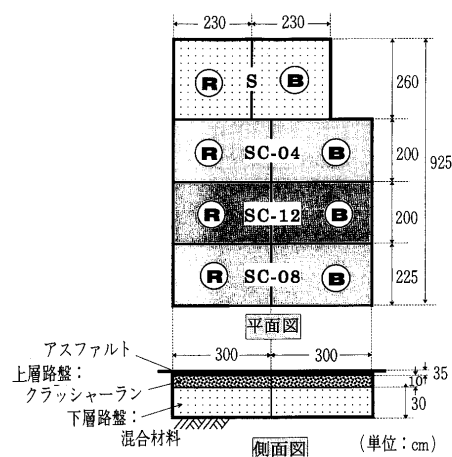
4. 下層路盤への適用性の検討

表—3の配合率にて石灰水洗スラッジと水砕スラグをバックホウにより現場で混合した後、振動ローラー(R区域)とバックホウの走行荷重(B区域)とを用いて乾燥密度 $1.2 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ で転圧し、図—6に示すような8区間での舗装道路施工を行った。なお、一軸圧縮試験用供試体を採取するために、転圧時に塩化ビニール製モールド(内径10 cm, 高さ20 cm)を静的に埋設した。

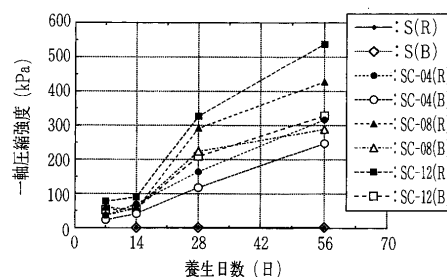
図—7は、採取した供試体によって測定された一軸圧縮強度の経時変化である。一般に、粒状材料を道路の下層路盤に適用する場合、CBR20%以上が規定されている⁶⁾。CBR値と一軸圧縮強度 q_u の関係を $\text{CBR} = 10 q_u$ と仮定して、一軸圧縮強度に換算すると $q_u \geq 196.2 \text{ kPa}$ の強度が必要である。本実験によれば石灰水洗スラッジを8%以上添加した混合材料では、28日養生後196.2 kPa以上の強度を得ている。このことから、実施工においても、石灰水洗スラッジの添加率によって、水砕スラグの強度発現特性をコントロールすることが可能であることが確認された。

5. おわりに

従来、産業廃棄物として投棄されていた石灰水洗スラッジは、粉体状に加工することによって取扱いが容易となり、水砕スラグへのアルカリ刺激剤としての有効利用が可能となる。このような産業副産物の混合材料を地盤



図—6 下層路盤施工実験の平面および側面図



図—7 下層路盤施工実験による一軸圧縮強度の経時変化

材料へ適用することは、環境影響の低減に寄与するところが多い。石灰水洗スラッジと水砕スラグの混合作業は、施工現場にて容易に行うことが可能であり、水砕スラグの有する地盤工学的特性を損なうことなく、早期の強度発現を制御することができる。したがって、本混合材料は、掘削工事における裏込め材料や地下空洞部の充填補修材料など広範囲の土木工事への適用が期待される。また、著者らの試算によれば、その市場コストは水砕スラグへのアルカリ刺激剤として消石灰を用いた場合の約1/2程度と安価である。今後は、産出地の異なる水砕スラグへ適用性や初期含水比が強度発現に及ぼす効果などのデータを蓄積し、実際施工のための配合設計指針についての検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究は、岡山県特定中小企業集積活性化促進事業(1995～1999)によって実施されたものであり、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：資料「土工用水砕スラグ」, 1998.
- 2) 沿岸開発技術研究センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書, pp. 2～10, 1989.
- 3) 岡山県石灰工業協同組合内部資料
- 4) 川崎製鉄内部資料
- 5) 土壌物理研究会編：土の物理学, 森北出版, pp. 211～238, 1979.
- 6) 日本道路協会編：アスファルト舗装要綱, 日本道路協会, 1998.

(原稿受理 2000.1.11)