

報告 焼却灰溶融スラグを用いたコンクリートの特性と実施工への適用

錦織 和紀郎^{*1}・菅原 邦彦^{*2}・野口 孝俊^{*3}・小河 洋夫^{*4}

要旨：近年の一般廃棄物の増加に伴い、清掃工場から排出される焼却灰溶融スラグの量も増加の一途を辿っている。筆者らは、焼却灰溶融スラグを天然の細骨材と同等の品質に改善する加工機械を開発し、加工した焼却灰溶融スラグを細骨材として全量使用したコンクリートの配合設計手順、フレッシュ性状、強度特性等が、通常のコンクリートと同様であることを明らかにした。また、基礎ブロックの施工を行い、生コン工場での練混ぜや施工性を調べ、焼却灰溶融スラグの加工技術は実用的であることを確認した。

キーワード：リサイクル、粒子の加工、細骨材の粒形、焼却灰溶融スラグ、試験施工

1. はじめに

近年の一般廃棄物の増加に伴い、清掃工場から排出される焼却灰の量も増加の一途を辿っており、首都圏での最終処分残余年数は数年と推定されている¹⁾。そのため、最近では焼却灰を溶融した後急冷してスラグ化し、焼却灰を減容化する技術が普及しつつある。しかしながら、焼却灰溶融スラグ（以下ゴミスラグと呼ぶ）は粒度や粒形が悪いため、有姿のまま利用することは困難で、依然として埋立処分されることが多いのが現状である。このようなことから、筆者らはゴミスラグを加工する機械を開発し、加工したゴミスラグは天然の細骨材と同様に使用できる可能性があることを明らかにした²⁾。

一方、運輸省では港湾におけるリサイクルに積極的に取り組んでいる。ゴミスラグは、港湾の背後地等の近隣の都市部において発生するものであるため、港湾においてリサイクルすることは、有効な活用方法である。このような背景により、本報告は、ゴミスラグの加工技術を港湾コンクリート工事に適用し、技術の確認を行った成果を報告するものである。

2. ゴミスラグの加工方法

2.1 ゴミスラグの特徴

ゴミスラグを細骨材として見た場合の問題点および加工のポイントをまとめると、表-1のようになる。細骨材として使用するに当たっての最大の問題点は、角張った粒子や針状の粒子を多量に含んでいることであり、有姿のままコンクリートに使用すると、単位水量が非常に多くなり、ブリーディングもかなり多くなるため、細骨材として多量に使用することはできない。したがって、加工改善は不可欠であり、そのポイントは、粒形の良質化（球形化）にある。

表-1 ゴミスラグの問題点と加工のポイント

項目	ゴミスラグの問題点	加工のポイント
粒 度	・粒度がやや粗い ・微粉分が少ない	⇒ 粒度分布を平行移動する
粒 形	・角張った粒子や針状の粒子が多い	⇒ 粒子を球形化する
混入物	・鉄分を多く含む	⇒ 鉄分の除去
そのまま細骨材に用いた場合の問題	・単位水量が増加 ・ブリーディングが非常に多い ・発錆の懸念	⇒ 粒子の球形化 ・微粉量増加 ⇒ 鉄分の除去

*1 (株)テトラ環境事業本部技術部 工修（正会員）

*2 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所次長

*3(前) 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所第一工事課第二工事係長

*4 晴海小野田レミコン(株)工場次長

一方、混入物に注目すると、重量で10%程度以上の鉄分を含むことが多い。したがって、そのまま細骨材に使用すると発錆等の懸念があるため、鉄分を除去する必要がある。

2.2 加工機械（磨砕機）の概要

一般に粒子を細粒化する機械は、ロッドミルのような、粉碎媒体を用いて粒子に荷重をかけて破碎するものである。しかしながら、このような機械でゴミスラグを加工すると粒子に新たな角が生じ、粒形の改善までは行うことができない。そこで、筆者らは粒子同士の摩擦により加工する機械を考案した（図-1、以下磨砕機と呼ぶ）。この機械は、ゴミスラグを内部に滞留させ、ドラムを高速回転することによりゴミスラグを流体のように回転させ、粒子の摩擦により角を削って球形化しながら粒度調整（磨砕加工）する機械であり、時間当りの処理能力は2～8 tである。また、加工により発生した微粉は分離せず、細骨材として使用できる。

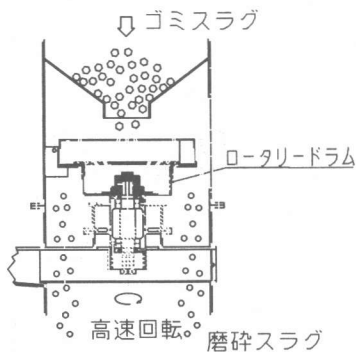


図-1 加工機械（磨砕機）の構造

3. 工事の概要

本工事は、約50 tのゴミスラグを磁選（鉄分除去）および磨砕加工し（以下磨砕加工したゴミスラグを磨砕スラグと呼ぶ）、細骨材としての磨砕スラグや磨砕スラグを細骨材の全量に使用したコンクリート（以下スラグコンクリートと呼ぶ）の品質を調べた上で東京国際空港（羽田空港）の制限フェンスの基礎ブロックを施工し、フェンスを設置したものである（図-2）。ここで、磁選および磨砕加工は5 t/hrの条件で実施し、ブロック製作は平成9年2月に行った。

施工位置図を、図-3に示す。フェンスの延長は499mで、設置した基礎ブロックは再利用品も含めて置型(600×1950×500mm) 223個、埋込型(600×600×900mm) 32個である。これら基礎ブロックのうち、呼び強度を3通り変えたスラグコンクリートで69個、普通コンクリートで21個の置型ブロックを製作した（表-2）。

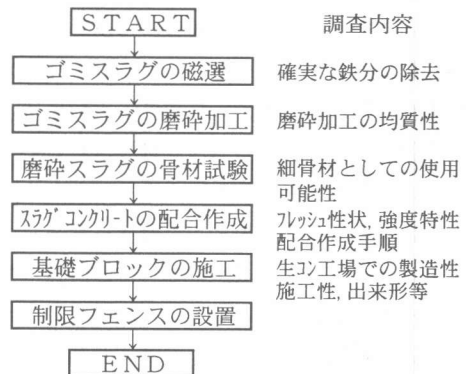


図-2 工事の流れおよび調査内容

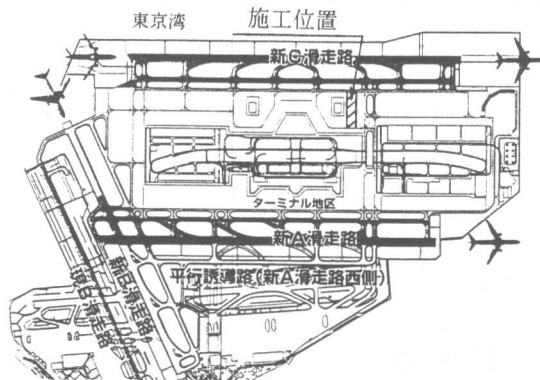


図-3 施工位置図

表-2 基礎ブロック製作数量

名 称	仕 様	数 量
基礎ブロック (置 型)	600 ^B ×1,950 ^L ×500 ^H スラグコンクリート 16-8-20	23個 (13m ³)
	600 ^B ×1,950 ^L ×500 ^H スラグコンクリート 18-8-20	23個 (13m ³)
	600 ^B ×1,950 ^L ×500 ^H スラグコンクリート 21-8-20	23個 (13m ³)
	600 ^B ×1,950 ^L ×500 ^H 普通コンクリート 16-8-20	21個 (12m ³)

4. 磁選および磨砕スラグの骨材試験結果

4.1 磁選の結果

約50tのゴミスラグを磁選し、残留鉄分を測定した結果を表-3に示す。ここで、測定対象は、ゴミスラグ5試料、磁選スラグ10試料である。表-3より、良好かつ均質な磁選がなされたことが確認できる。

表-3 磁選の結果

試料種別	鉄分含有率(%)	
	平 均	標準偏差
ゴミスラグ	10.81	0.64
磁選スラグ	0.44	0.11

4.2 粒形改善の評価

本磨砕機は、粒形を改善できることに特徴がある。そこで、ゴミスラグおよび磨砕スラグの粒子の顕微鏡写真を撮影し、粒形の改善を確認した。更に、式(1)で定義する粒子の円形度係数を、画像解析により測定した結果の一例を図-4に示す。ここに、A：粒子の総面積、L：粒子の総周長である。また、図-4には、実積率62.3%の陸砂のデータも併せて示した。

$$\text{円形度係数} = 4\pi A / L^2 \quad (1)$$

図-4より、磨砕スラグの粒形は、ゴミスラグに対して著しく改善され、良質な天然砂よりも更に良好であることが確認できる。

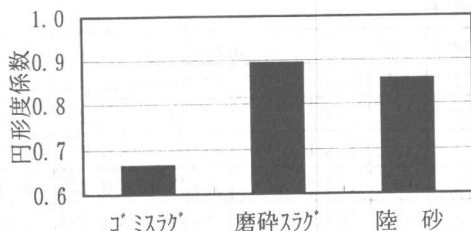


図-4 粒形比較の例

4.3 磨砕スラグの骨材試験結果

磨砕スラグの細骨材としての使用可能性を確認するために、JISに規定される一連の骨材試験を実施した。ここで、粒度、比重、吸水率および実積率については、作製した磨砕スラグの均質性を確認するため、抜取りにより採取した5試料を対象とした。また、ゴミスラグについても、比較のため一部試験を行った。

試験結果を、表-4および図-5に示す。これらの図表より、良質で均質な細骨材としての磨砕スラグが作製され、実工事に充分適用可能な細骨材が得られたものと判断できる。特に、実積率は72%以上と極めて高く、粒形の観察結果と併せて、かなり良好な加工がなされたことが判る。

表-4 骨材試験結果

試 験 項 目	JIS A 5005	ゴミスラグ	磨砕スラグ
粗粒率		3.19	2.12-2.31
絶乾比重	2.5以上	2.48	2.50-2.54
表乾比重		2.49	2.52-2.55
吸水率(%)	3.0以下	0.55	0.19-0.71
単位容積質量(kg/l)		1.46	1.83-1.84
実積率(%)		58.7	72.0-73.1
粒形判定実積率(%)	53以上		59.3
洗い損失(%)	7.0以下		8.4
粘土塊量(%)	1.0以下*		0.3
有機不純物	標準色液の色よりも濃くないこと		無色
石炭・亜炭等で比重1.95の液体に浮くもの(%)	0.5以下*		0.0
安定性(%)	10以下		0.2
塩化物量(%)	0.04以下*		0.003

注)*:JIS A 5308

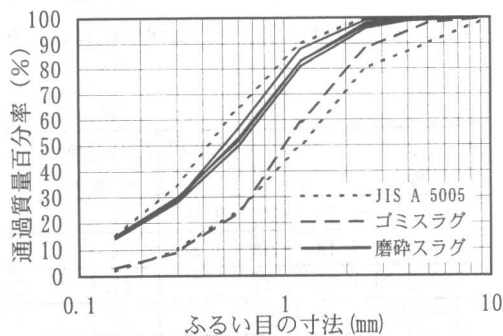


図-5 粒度分布

5. 配合作成およびフレッシュ性状

5.1 配合の種類および試験練り目標値

配合は、呼び強度16、18および21の3配合として、生コン工場の試験練り傾胴式ミキサーで作成した。荷卸し時の目標スランプは8 cm、空気量は4.5%とし、運搬時のロスを考慮して、試験練り時の目標値はスランプ10cm、空気量5.0%程度に設定した。

5.2 スランプおよび空気量の検討

水セメント比および細骨材率を生コン工場の実績を参考に設定し、試験練りによりスランプおよび空気量を検討した。

まず、空気量については、AE助剤量に対して直線的に増加することが確認された。また、スランプに注目すると、通常のコンクリートと同様に、単位水量の増加に伴いスランプが直線的に増加すること、およびある単位粗骨材容積の条件でスランプがピークとなる(図-6)ことが明らかとなった。このように、スランプおよび空気量に対する各配合要因の影響傾向は、通常のコンクリートと同様であることが確認された。

5.3 水セメント比の検討

スラグコンクリートの場合、通常のコンクリートと比較してブリーディングが多くなる傾向にある。そこで、水セメント比の検討においては、圧縮強度試験のみでなく、ブリーディングも試験した。また、比較の基準として、生コン工場の普通コンクリート16-8-20についても試験を実施した。

まず、スラグコンクリートの圧縮強度については、通常のコンクリートと同様にセメント水

比に対して直線的に圧縮強度が変化することが確認された。また、ブリーディングの試験結果は図-7に示す通りであり、ブリーディングは水セメント比が大きいほど多く、通常のコンクリートに比べてやや多いものの、問題のない範囲であることが判った。

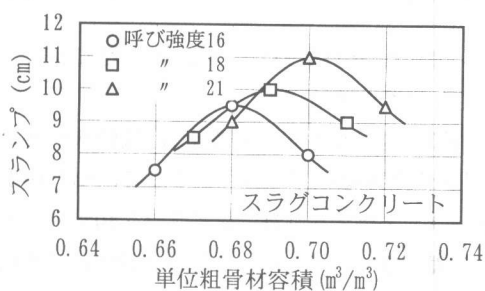


図-6 単位粗骨材容積とスランプの関係

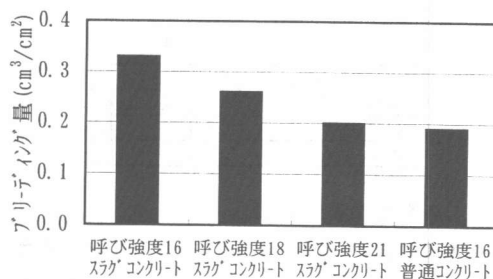


図-7 ブリーディング試験結果

5.4 配合決定および配合の特徴

以上の一連の試験より、スラグコンクリートは、通常のコンクリートと同様の手法で配合を作成できることが明らかとなった。これらの結果に基づき、本工事に用いるスラグコンクリートとして、表-5に示す3配合を決定した。また、表-5には、比較の基準として本工事に使用した普通コンクリートの配合も併せて示す。

表-5 本工事用の配合

種 別	呼び強度	配合強度 (N/mm²)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m³)				AE減水剤	AE助剤
					水	セメント	細骨材	粗骨材		
スラグコンクリート 16-8-20	16	22.8	67.9	45.0	151	222	842	1091	C×0.25%	9A
スラグコンクリート 18-8-20	18	24.8	64.4	43.8	151	234	814	1107	C×0.25%	9A
スラグコンクリート 21-8-20	21	27.8	59.9	42.5	152	254	783	1123	C×0.25%	9A
普通コンクリート 16-8-20	16	21.1	75.7	46.5	154	203	885	1064	C×0.25%	4A

注) スラグコンクリートの細骨材は全量磨砕スラグ

表-5より、スラグコンクリートの配合は、通常のコンクリート配合とほぼ同様で、単位水量はやや少なくできる。また、コンクリート1m³当り約800kgのゴミスラグを天然の細骨材に代えて利用できる。相違点としては、所定量の空気を連行するためのA E助剤量が多くなること、配合強度に対して水セメント比をやや小さく設定する必要があることが挙げられる。

6. 各種強度の特性

表-5の配合を対象に、各種強度を測定した結果を図-8～図-9に示す。図中黒塗りのデータは、普通コンクリートのものである。

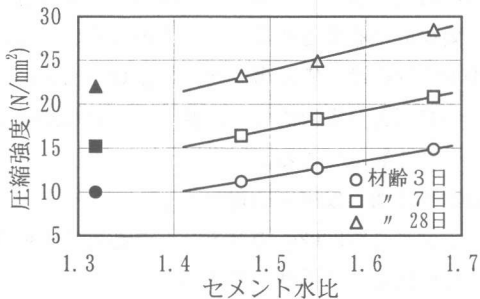


図-8 圧縮強度試験結果

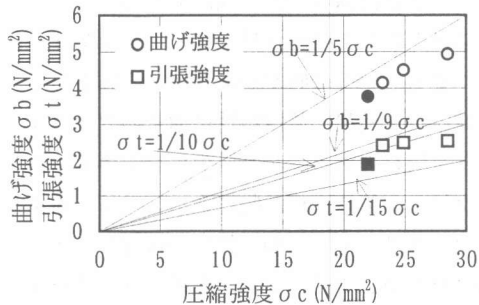


図-9 圧縮強度と曲げ強度、引張強度の関係

まず、圧縮強度に注目すると、図-8よりいずれの材齢においても通常のコンクリートと同様に圧縮強度はセメント水比に対して直線的に変化することが確認できる。また、スラグコンクリートの強度傾向線から推定すると、同一水セメント比の普通コンクリートに比べて、圧縮強度はやや小さいことが判る。次に、図-9より曲げ強度および引張強度と圧縮強度の比は、

通常のコンクリートと同等の関係にあることが判る。なお、ヤング率は $2.66 \sim 2.70 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ と通常のコンクリートと同等であった。

このように、スラグコンクリートの各種強度特性は、通常のコンクリートと同様であることが明らかとなった。

7. 実施工への適用

7.1 生コンの製造

基礎ブロック製作用の生コンは、生コン工場の実機ミキサー(3m³練りの強制二軸ミキサー)で製造した。ここで、練混ぜ時間や各材料の投入は、スラグコンクリート、普通コンクリートとも同じとした。

生コン製造時に、ミキサーの負荷(電流値)を測定した結果を図-10に示す。図-10より、スラグコンクリート練混ぜ時の負荷は普通コンクリートと同等であることが確認できる。

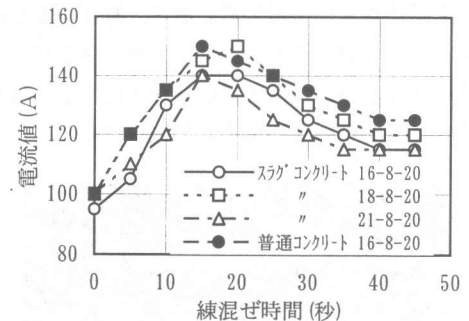


図-10 ミキサーの負荷

7.2 生コンの経時変化

実機ミキサーで製造した呼び強度18のスラグコンクリートを90分間アジテータ車で攪拌し、30分ごとに試料を採取してスランプおよび空気量を測定した。その結果を、図-11に示す。

図-11より、時間の経過に伴うスランプおよび空気量の低下は、通常のコンクリートと同等であることが判る。したがって、スラグコンクリートの配合作成においては、通常のコンクリートと同等のロスを見込めば良いと言える。

7.3 施工性

基礎ブロックの製作においては、天端均し可

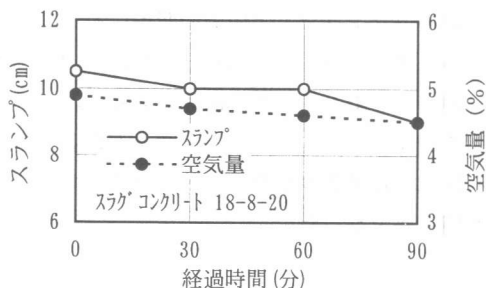


図-11 スランプ、空気量の経時変化

能な時期の比較を行った。施工時の天候は晴れで、気温は10～15℃、コンクリート温度は11～12℃であったが、スラグコンクリートおよび普通コンクリートとも天端均し可能な時期は概ね打設後3時間であった。また、打設や締固め等の作業性についても同等であった。これらのことより、スラグコンクリートの施工性は通常のコンクリートと同等であることが確認された。

7.4 製品の来形

基礎ブロックの出来形の例を、写真-1に示す。スラグコンクリートはブリーディングが多くなることから、出来形が懸念されたが、写真より全く問題のない出来形が確保された。

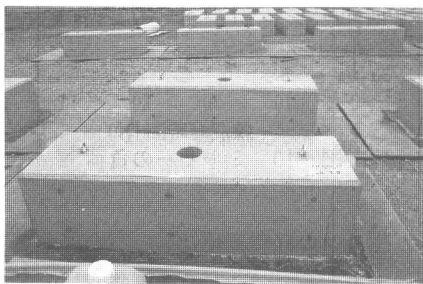


写真-1 基礎ブロックの出来形

7.5 強度性状

現場養生供試体により、材齢1年までの圧縮強度を測定した結果を図-12に示す。図-12より、スラグコンクリートは普通コンクリートと同等以上の強度の伸びを示しており、材齢3～6ヶ月の間においても、強度がかなり増進していることが確認できる。このことより、磨砕スラグには活性があるものと推定される。

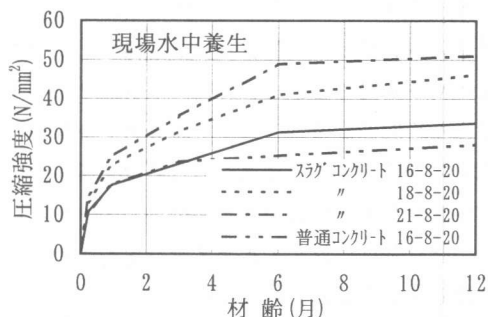


図-12 長期強度の測定結果（現場水中養生）

8. まとめ

以上より、ゴミスラグは磁選および磨砕加工することにより、コンクリート工事でリサイクル活用できることが明らかとなった。得られた主要な成果をまとめると、以下のようになる。

- (1)本磨砕機は、実工事レベルの多量の加工においても充分実用的で、均質かつ良好な磨砕スラグを製造できる。
- (2)本磨砕加工技術と磁選により、コンクリート1m³当り約800kgのゴミスラグを天然の細骨材に代えて全量利用できる。
- (3)スラグコンクリートの配合は、通常のコンクリートと同様の手順で設計できる。
- (4)スラグコンクリートは、ブリーディングが多くなること等の特徴があるが、全体としてフレッシュ性状、強度特性は通常のコンクリートと同様である。また、生コン工場でのコンクリート製造や構造物製作において、通常のコンクリートと同様の扱いが可能である。
- (5)スラグコンクリートは、普通コンクリートと同等以上の強度の伸びを示し、材齢3ヶ月以降も強度増進の割合が大きい。

参考文献

- 1)環境庁：平成8年版環境白書総説，515p，1996.6
- 2)堀 健治・錦織和紀郎・白子定治：焼却灰溶融スラグのコンクリート細骨材への適用，第49回土木学会年次学術講演会講演概要集第6部，pp.186-187，1994.9