

論文 膨張抑制処理を行った溶融スラグのコンクリート用細骨材への適用

佐々木 肇^{*1}・藤田 康彦^{*2}・関 勇治^{*3}・青山 光治^{*4}

要旨：一般廃棄物焼却灰の溶融スラグを磨砕処理し、さらに金属アルミニウムによる膨張を抑制するためスラグ改質剤によって改質処理を行った溶融スラグをコンクリート用細骨材として用いた試験を行った。その結果、磨砕処理によりブリーディングが小さくなること、スラグ改質処理により強度発現性が向上すること、置換率 100%でも天然骨材を用いた場合と同等の強度および耐久性を持つコンクリートの製造が可能になることが判明した。さらに、スラグ改質処理は蒸気養生を行うプレキャストコンクリートに対して特に有効であることが明らかとなった。

キーワード：溶融スラグ、膨張抑制、磨砕、コンクリート、プレキャストコンクリート

1. はじめに

近年、廃棄物の最終処分場の建設地確保の困難さから、廃棄物を溶融処理する自治体が増加している。溶融処理の目的は、減容化による最終処分場の延命化や重金属類の不溶化であったが、資源循環型社会構築の機運の高まりから溶融スラグの有効利用が注目されている。溶融スラグの有効利用用途は、埋戻し材などの土質材料のほか路盤材やコンクリート用骨材などの岩石材料としての適用性が検討されてきた。その結果、2006 年 7 月に「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」として JIS が制定された¹⁾。

岐阜県南部の 10 市町村により構成された可茂衛生施設利用組合のささゆりクリーンパークにおいても年間約 4,500t の溶融スラグを産出しており、その半分程度を有効利用している。今後、更なる有効率の向上のため、コンクリート用細骨材への適用性に注目している。

現在、産出されている溶融スラグは、ほとんどが急冷（水砕）スラグであるため、粒子はガラス質で角張った形状をしており、針状粒子も含まれているため、コンクリート用骨材として

使用する場合、コンシステンシーを確保するのに必要な単位水量が増加する²⁾。このため、松田ら³⁾は、溶融スラグを高速遠心磨砕処理することにより、粒子の形状が改善され、ブリーディングの低減、フローおよび強度の改善効果が得られることを報告している。

また、一部の溶融スラグでは金属アルミニウムの含有により、コンクリートの膨張、ひび割れ、色むらが発生する問題があり、今回制定された JIS では、「膨張率 2 % 以下」の基準値が設けられている。

筆者らは、金属アルミニウムを含有している溶融スラグに硝酸／亜硝酸塩系の薬品（以下、スラグ改質剤）を溶融スラグの磨砕処理などの二次加工段階で添加することにより、金属アルミニウムを不活性にしてアルカリ環境化における腐食を防止し、コンクリートの膨張を抑制する技術を開発した。

本論文は、高速遠心式スラグ磨砕装置による粒度・粒径調整とスラグ改質剤による膨張抑制処理を行った溶融スラグのコンクリート用細骨材への適用性についての検討結果をまとめたものである。

*1 (株) 間組 技術研究所 技術研究第一部 (正会員)

*2 (株) フローリック コンクリート研究所 (正会員)

*3 福祉商事 (株) 建設資材営業部

*4 可茂衛生施設利用組合 ささゆりクリーンパーク

2. 試験方法

2.1 磨砕処理と膨張抑制処理

(1) 磨砕処理

磨砕処理に用いた装置の概要を図－１に示す。
溶融スラグの磨砕処理条件は、処理速度 2.5t/h、
回転数 2,200rpm とした。

磨砕加工により、単位容積質量は 1.67g/ml から
1.87g/ml に、実積率は 58.2%から 64.7%に、
また粗粒率は 3.93 から 2.67 に改善された。

図－２に磨砕処理前後の粒度分布を示す。

(2) 膨張抑制処理

スラグ改質剤を磨砕処理した溶融スラグに対
して溶融スラグ質量の 5 %添加し、200 l 傾胴式
ミキサーにて 3 分間混合した後、表面水の調整
を行った。

なお、比較のためスラグ改質剤を添加せず、
水道水を溶融スラグ質量の 5 %添加したものも
製造した。

2.2 使用材料

試験に使用した材料を表－１に示す。

溶融スラグは、ささゆりクリーンパークにお
いて一般廃棄物の焼却灰をプラズマ式溶融方式
により製造したものをを用いた。

2.3 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は、100 l の強制練りパン
型コンクリートミキサーを用いて行った。

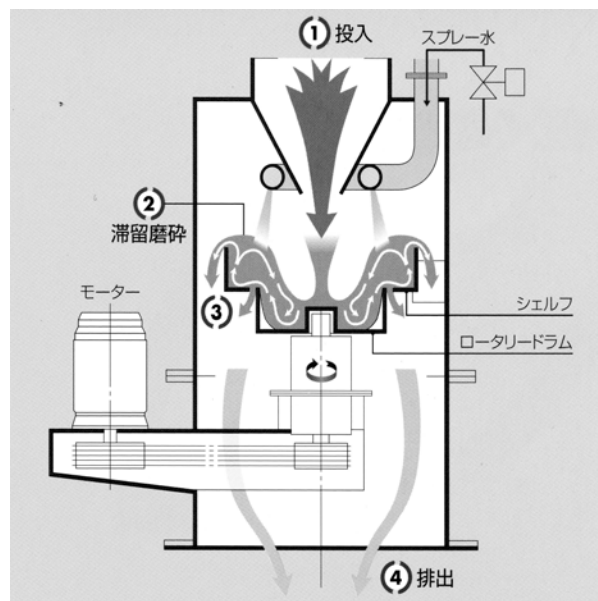
コンクリートの配合を表－２に示す。コンク
リートの水セメント比は 50%，細骨材率は
49.0%とした

溶融スラグは細骨材の一部として容積比で内
割り置換を行った。コンクリートの目標スラン
プは $18 \pm 1.5\text{cm}$ ，空気量は $4.5 \pm 1.0\%$ とした。

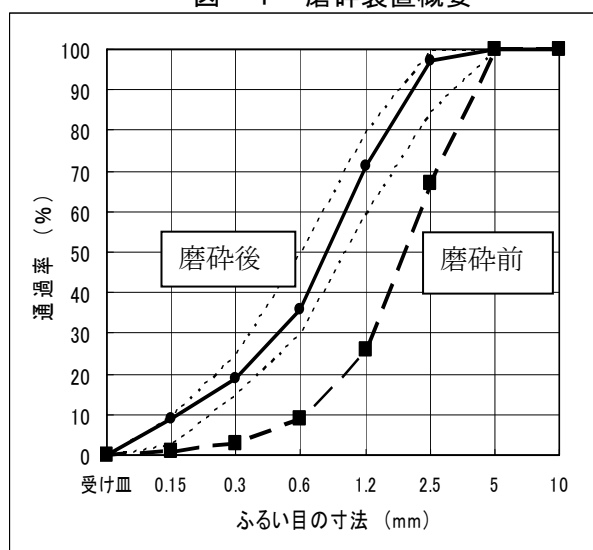
2.4 試験項目

コンクリートの試験項目と試験方法を表－３
に示す。

膨張量試験は、 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ の鋼製円筒形型枠
にフレッシュコンクリートを高さ 19cm まで充
填し、上部を平滑にした後、アクリル製平板を
載せダイヤルゲージにて変化量を計測した。測
定時間は 24 時間後とした。



図－１ 磨砕装置概要



図－２ 磨砕処理による粒度分布の変化

表－１ 使用材料

材 料	仕 様
水	つくば市水道水
セメント	普通ポルトランドセメント 三銘柄混合，密度： 3.16g/cm^3
細骨材	木更津産山砂 密度： 2.59g/cm^3 ，吸水率：1.15% 溶融スラグ（ささゆりクリーン パーク産，プラズマ式） 密度： 2.86g/cm^3 ，吸水率：0.29%
粗骨材	青海産碎石 密度： 2.72g/cm^3 ，FM：6.70
混和剤	リグニンスルホン酸塩， オキシカルボン酸塩

表－２ コンクリートの配合

配合名	置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)						備 考
		水	セメント	細骨材	溶融スラグ	粗骨材	混和剤	
N－0	0	170	340	876	0	918	3.4	天然骨材使用，比較用
N－15	15	170	340	745	142	918	3.4	未処理溶融スラグ使用
N－30	30	170	340	614	285	918	3.4	未処理溶融スラグ使用
N－50	50	170	340	438	475	918	3.4	未処理溶融スラグ使用
N－100	100	170	340	0	950	918	3.4	未処理溶融スラグ使用
A－15	15	170	340	745	142	918	3.4	改質処理溶融スラグ使用
A－30	30	170	340	614	285	918	3.4	改質処理溶融スラグ使用
A－50	50	170	340	438	475	918	3.4	改質処理溶融スラグ使用
A－100	100	170	340	0	950	918	3.4	改質処理溶融スラグ使用

表－３ 試験項目とその方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101-1998
空気量	JIS A 1128-1999
凝結時間	JIS A 1147-2001
ブリーディング	JIS A 1123-2003
圧縮強度	JIS A 1108-1999
凍結融解抵抗性	JIS A 1148-2001
長さ変化	JIS A 1129-3-2001

コンクリートの養生は標準水中養生としたが、圧縮強度試験用供試体の一部は蒸気養生を行った。蒸気養生の養生条件は、前養生 20℃，2 時間後，20℃/h にて 60℃まで昇温，3 時間蒸気養生後，自然冷却とした。圧縮強度の測定材齢は，標準水中養生では 1 日，3 日，7 日，14 日，28 日および 91 日の 6 材齢とし，蒸気養生では，1 日，3 日，7 日および 14 日の 4 材齢とした。

3. 試験結果と考察

3.1 膨張試験

溶融スラグの膨張率の確認をするため，未処理の溶融スラグとスラグ改質剤により処理を行った溶融スラグを用いて，JIS A5031:2006 附属書 1 に基づく膨張率試験を行った。

その結果，未処理の溶融スラグの膨張率は 2.6%であるのに対して改質処理を行った溶融スラグは 0.0%となり，膨張抑制効果が確認できた。

表－４ コンクリートの膨張量

配合	膨張量 (mm)
N－0	－ 2 . 5 3
N－15	－ 2 . 3 7
N－30	－ 0 . 8 8
N－50	－ 0 . 5 7
N－100	3 . 4 6
A－15	－ 2 . 4 7
A－30	－ 1 . 8 5
A－50	－ 1 . 9 7
A－100	－ 1 . 5 6

また，各配合のコンクリートの膨張量試験の結果を表－４に示す。

コンクリート硬化収縮のため，天然骨材を使用したコンクリート（N－0）では，膨張量はマイナス（収縮）になる。しかし，未処理の溶融スラグを用いたコンクリートは，硬化収縮と膨張のバランスにより測定値は変化するが，溶融スラグの置換率が大きくなるに従い膨張量は大きくなるのに対して，改質処理を行った溶融スラグの場合は，置換率 30%以上でもほぼ一定の膨張量を示した。

3.2 フレッシュコンクリートの性状

(1) スランプと空気量

各配合のコンクリートのスランプと空気量の試験結果を表－５に示す。

表－５ スランプと空気量

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)
N－0	18.0	4.5
N－15	18.0	4.6
N－30	18.0	4.6
N－50	13.0	4.8
N－100	5.5	4.5
A－15	18.0	4.5
A－30	17.0	4.8
A－50	13.5	4.9
A－100	6.5	4.7

表－６ ブリーディング量

配合	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	
	磨砕あり	磨砕なし
N－0	0.22	－
N－15	0.21	0.28
N－30	0.19	0.34
N－50	0.18	0.35
N－100	0.14	0.64
A－15	0.21	－
A－30	0.17	－
A－50	0.21	－
A－100	0.14	－

スラグ改質処理の有無にかかわらず、溶融スラグの置換率が、50%を超えるとスランプは著しく低下するのに対し、空気量は置換率に関係なくほぼ一定の値を示した。このことから、スラグの改質処理は、スランプおよび空気量には影響しないものと考えられる。

(2) ブリーディング

各配合のコンクリートのブリーディング量試験結果を表－６に示す。なお、比較のため磨砕処理を行っていない溶融スラグを用いた場合の試験も合わせて実施した。置換率 100%の場合、天然骨材を用いたコンクリートと比較して、約半分程度のブリーディング量になった。溶融スラグを用いた場合、置換率が大きくなるとブリーディング量は大きくなるとされているが、磨砕処理を行うことによりブリーディングを小さく

表－７ 凝結時間

配合	凝結時間 (時：分)	
	始発	終結
N－0	6：43	8：48
N－15	6：51	9：09
N－30	6：52	9：10
N－50	6：37	8：56
N－100	7：50	10：18
A－15	6：54	8：59
A－30	6：43	8：59
A－50	6：21	8：35
A－100	6：27	8：53

くすることが可能になると考えられる。

(3) 凝結硬化速度

コンクリートの凝結時間を表－７に示す。

未処理の溶融スラグを用いたコンクリートでは、北辻ら²⁾が報告しているように置換率が大きくなるに従って始発時間が遅くなっている。この原因として金属アルミニウムとセメントの反応により発生した水素が上部に移動するため、コンクリートの上部が脆弱になり見掛けの始発時間が遅くなることも考えられる。

一方、スラグ改質剤により改質した溶融スラグを用いたコンクリートの始発時間は、置換率が大きくなるに従い早くなる傾向を示す。これは、スラグ改質剤の成分が凝結速度を促進するためと考えられる。

3.3 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

標準養生を行ったコンクリートの圧縮強度試験結果を表－８に、蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度試験結果を表－９に示す。

標準養生の場合、スラグ改質剤による改質処理の有無にかかわらず置換率 50%までは天然骨材を用いたコンクリートと同程度の強度となっているが、置換率 100%では、未処理の溶融スラグを用いたコンクリートは強度が低下するのに対して、改質処理を行ったものは強度低下を生じないため、スラグ改質剤による効果があるも

表－8 標準養生を行ったコンクリートの圧縮強度

配合名	材 齢 (日)					
	1 日	3 日	7 日	14 日	28 日	91 日
N－0	6. 6	20. 8	32. 2	36. 8	42. 9	49. 0
N－15	7. 0	23. 9	34. 6	39. 4	45. 8	52. 7
N－30	6. 9	23. 4	32. 2	37. 4	44. 2	51. 3
N－50	7. 3	23. 6	32. 6	37. 1	41. 3	51. 2
N－100	4. 6	16. 4	26. 4	31. 3	33. 6	43. 4
A－15	7. 0	22. 9	34. 0	38. 9	45. 3	52. 3
A－30	7. 4	22. 6	31. 5	35. 5	42. 6	50. 9
A－50	7. 7	23. 0	31. 6	36. 1	41. 6	51. 5
A－100	5. 1	18. 8	30. 2	35. 0	40. 6	52. 5

単位：N/mm²

表－9 蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度

配合名	材 齢 (日)			
	1 日	3 日	7 日	14 日
N－0	17. 8	24. 0	29. 0	30. 8
N－15	17. 2	22. 5	27. 4	29. 0
N－30	17. 1	22. 9	26. 8	29. 1
N－50	12. 7	20. 6	23. 4	24. 4
N－100	9. 0	14. 7	14. 2	16. 5
A－15	17. 7	23. 9	29. 0	31. 0
A－30	17. 5	23. 8	28. 7	31. 9
A－50	16. 7	23. 1	26. 7	30. 2
A－100	17. 7	24. 7	25. 4	30. 7

単位：N/mm²

のと考えられる。

また、蒸気養生を行った場合、未処理の溶融スラグを用いたコンクリートでは置換率 50%以上になると強度の低下が大きく、置換率 100%では天然骨材の半分程度の強度しか発現しない。これに対して、スラグ改質剤により改質処理を行った溶融スラグは、置換率 100%でも強度の低下は生じないため、蒸気養生を行うプレキャストコンクリートでは効果が大きいと考えられる。

(2) 凍結融解抵抗性

図－3 に相対動弾性係数の経時変化を示す。未処理の溶融スラグを用いたコンクリートは置換率 100%では、200 サイクル以降の相対動弾性係数が大きく低下するが、スラグ改質処理を行った溶融スラグは、既往の研究⁴⁾ で報告されて

いるような相対動弾性係数の低下は見られなかった。この要因としては、未処理の溶融スラグを 100%使用した場合、金属アルミニウムの反応により水素が発生し、気泡が供試体内部に多く存在しているため凍結融解の影響を大きく受けているものと考えられる。

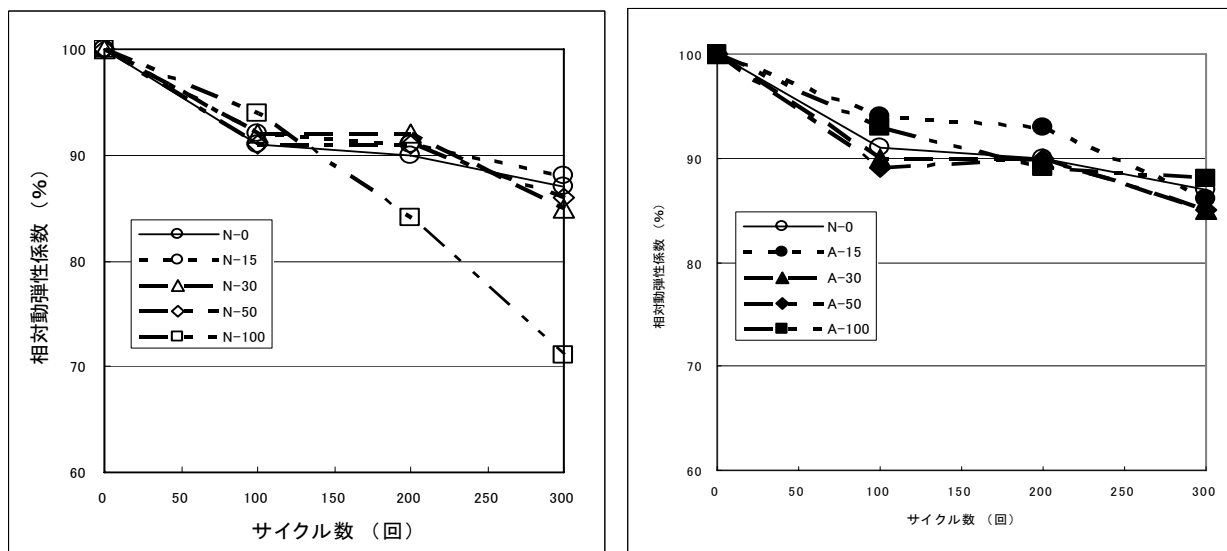
(3) 長さ変化

図－4 に長さ変化率の変化を示す。スラグ改質処理の有無にかかわらず溶融スラグの置換率が大きくなるに従い、長さ変化率は小さくなる傾向が見られた。この要因として溶融スラグの吸水率が小さいことが考えられる。

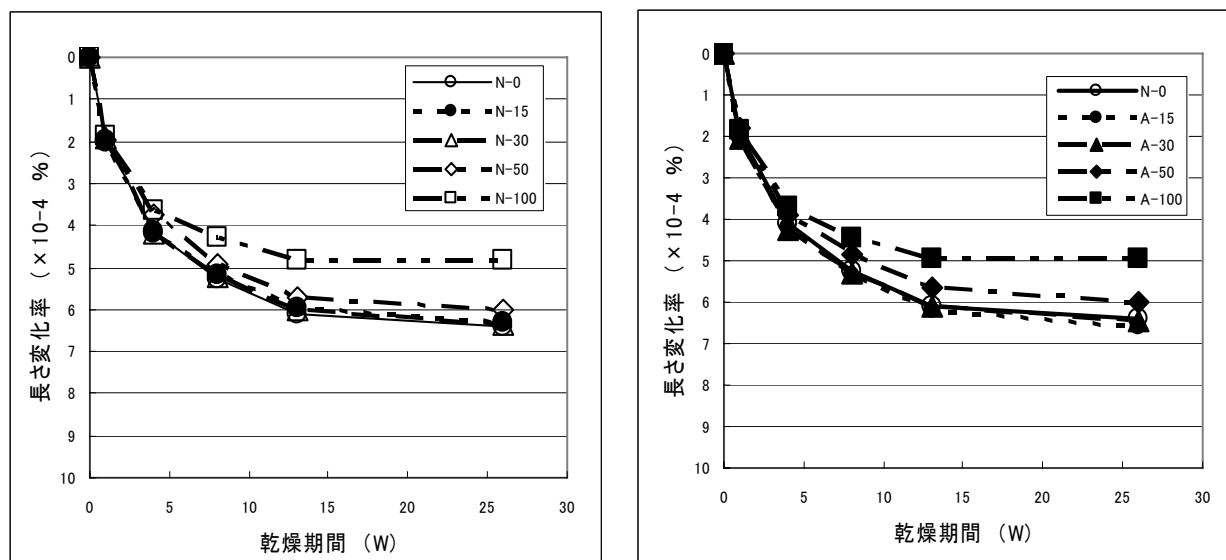
4. まとめ

一般廃棄物焼却灰の溶融スラグを磨砕処理し、さらに金属アルミニウムによる膨張を抑制するスラグ改質剤によって改質処理を行った溶融スラグをコンクリート用細骨材として用いた試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 磨砕処理を行った溶融スラグを使用したコンクリートのブリーディングは小さくなる。
- (2) スラグ改質剤による改質処理を行わない溶融スラグを用いた場合、置換率 50%程度までは強度および耐久性に大きな影響を与えないのに対し、改質処理を行った場合、置換率 100%でも天然骨材を用いた場合と同等の強度および耐久性を有する。



図－３ 相対動弾性係数の経時変化



図－４ 長さ変化率の変化

(3) スラグ改質剤による改質効果は蒸気養生を行う場合に特に有効であるため、プレキャストコンクリートへの適用が期待できる。

今後は、溶融方式、条件の異なる溶融スラグに対して磨砕処理、改質処理の効果の確認と、スラグ改質剤の添加方法、添加量の確認など実用化に向けた取組みを進めてゆきたい。

参考文献

- 1) JIS A 5031:2006：一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材，日本規格協会，2006.7
- 2) 北辻政文，藤居宏一：ごみ溶融スラグを細骨

材として用いたコンクリートの性質，農業土木学会論文集，No.200，pp.59-67，1999.4

- 3) 松田節男，錦織和紀郎，平戸誠一郎：溶融スラグの細骨材利用における磨砕加工の効果，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp.335-336，2004.9
- 4) ：溶融スラグの細骨材利用における磨砕加工の効果，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp.335-336，2004.9
- 5) 佐々木肇，寺谷俊明，榊原純一，喜多達夫：都市型廃棄物溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp319～324，2001.6