

# 論文 廃棄物汚泥溶融スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートのフレッシュおよび硬化性状

原 竜也\*<sup>1</sup>・丸山久一\*<sup>2</sup>・桃井清至\*<sup>3</sup>・坂田 昇\*<sup>4</sup>

**要旨:** 溶融スラグとは下水汚泥を燃焼させた際に生成される産業廃棄物であり、現在各方面において利用方法が検討されている。本研究では球状化した溶融スラグ粉体（球形灰）の高流動コンクリート用混和材としての適用性について、フレッシュ性状および硬化性状の両面から検討したものである。その結果、混和材として球形灰を用いても、良好なフレッシュおよび硬化性状を示す高流動コンクリートの製造が可能なること、球形灰を用いた場合、粉体系の配合ではスランプフローロスが顕著になるが、増粘剤を用い併用系の配合にすることで、フローロスの小さい高流動コンクリートとなることが明らかになった。

**キーワード:** 溶融スラグ, 球形灰, 高流動コンクリート, 水膜モデル

## 1. はじめに

近年、増加する下水汚泥などの廃棄物を減量・減容・安定無害化する目的で溶融処理が行われている。しかしその結果、無機残留物である溶融スラグが生成され、この有効利用が大きな課題となっている。現在溶融スラグは、窯業原料や一部の建設資材として利用されているのみで、利用効率を向上させるため大量に消費される分野での利用が望まれている<sup>1)</sup>。

また近年、実施工への適用も多く見られるようになった高流動コンクリートは、その配合上の特徴からセメント等の粉体材料を比較的多量に用いるものであり、良質で安価な混和材が望まれる。中村らは、粒度をセメントと同程度に調整した溶融スラグを混和材として用いても、良好なフレッシュ性状を示す高流動コンクリートが製造できることを明らかにしている<sup>2)</sup>。

本研究では、球状化を試みた溶融スラグ粉体（球形灰）の高流動コンクリート用混和材としての適用性を検討するため、高流動コンクリートに必要なフレッシュ性状試験を行なうとともに、硬化性状として強度試験および乾燥収縮ひび割れ試験を行った。

## 2. 溶融スラグ

溶融スラグは大別すると、粉碎スラグと球形灰に分けられる。粉碎スラグは、約1500度の高温で燃焼させ、融液状態になった下水汚泥を何らかの方法で急冷し、固形状になった塊状スラグを細かく砕くことによって、微粉末状にするものである。この手法の利点は、粉碎時間により粒度を自由に調整できることであるが、ある程度以上細かくする場合には効率が悪く、経済的ではない。これに対し球形灰は、800度程度に燃焼させた汚泥の残留物（焼却灰）を瞬時に高温バーナーの炎を通過させることで、その表面を溶融させ自身の表面張力によって球状化させるものである。粒度は原料性状により決定されるが、概ねセメント粒子と同程度の10~20 $\mu$ mである。この手法では粉碎作業が不要であるため、粉碎スラグよりもコストが安い。現在、溶融スラグの利用検討は、球形灰を中心に行われており、本研究でも球形灰について検討を行うこととした。

## 3. フレッシュ性状試験

### 3.1 試験概要

中村らの報告により、粉碎スラグを混和材とし

\* 1 長岡技術科学大学大学院 工修（正会員）

\* 2 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 Ph.D（正会員）

\* 3 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 工博

\* 4 鹿島技術研究所 工博（正会員）

表-2 フレッシュ性状試験に用いた材料

材 料	特 性
水 (W)	水道水
細骨材 (S)	川砂, 比重: 2.58 吸水率: 1.87%, F.M.=2.50
粗骨材 (G)	石灰碎石, 比重: 2.68 吸水率: 0.43%, 実績率: 58.5%
高性能減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

表-1 フレッシュ性状試験に用いた粉体の物性値

粉体名	記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	メジアン径 (μm)
中庸熟セメント	MPC	3.22	3230	15.95
球形灰	HAY	2.63	2046	12.31

表-3 フレッシュ性状試験時の配合およびフレッシュ性状

Vw/Vp (%)	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP (P×%)	スランプ フロー値(cm)	V漏斗 流下時間(s)	KP付着量 (g)
		W	MPC	HAY	S	G				
63.1	39.2	164	419	342	731	784	0.7	63.8	14.4	1.6

※ Vw/Vp: 水粉体体積比  
P = MPC + HAY (重量)

て用いた高流動コンクリートは、良好なフレッシュ性状を示すことが確認されている<sup>2)</sup>。しかし、球形灰を混和材として用いた高流動コンクリートについては検討されていない。そこで、球形灰を混和材として用いた高流動コンクリートの配合について実験的に検討した。

本実験に用いた粉体の物理的特性を表-1に、コンクリートに使用した粉体以外の材料を表-2にそれぞれ示す。ここで、粉体の比表面積はブレン空気透過装置により測定したものであり、平均粒径は粒度分布から求めたメジアン径を採用した。また、粒度分布はレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置により測定した。

骨材量は、岡村らが提案している配合設計法<sup>3)</sup>と同様に、細骨材体積を空気を含まないモルタル容積の40%、粗骨材体積をその実績率の50%に相当する量とした。

中庸熟ポルトランドセメントと球形灰の混合比率は体積比で5:5とし、高性能AE減水剤はポリカルボン酸塩系を用いた。水粉体体積比(Vw/Vp)は、緑川らが提案している粉体粒子の凝集を考慮した水膜モデルを用いて決定した<sup>4)</sup>。表-3に求められた配合を示す。

練り上がったフレッシュコンクリートについて、スランプフロー試験、V漏斗試験およびキッチンペーパーを用いた材料分離評価試験を行った<sup>5)</sup>。材料分離評価試験は、静置したフレッシュコンクリートのペーストの分離を評価するために行ったもので、キッチンペーパーへのペーストの付着量

(KP付着量)が3g以上の場合、材料分離が顕著であると判定されるものである。

### 3.2 実験結果および考察

フレッシュ性状試験の実験結果を表-3に示す。選定した配合は、スランプフロー値65±5cm、V漏斗流下時間15±5秒を目標にしたものであり、本実験で用いた球形灰含有の高流動コンクリートは、ほぼその性能を満足し、ペーストの分離も問題ないと判定された。

本実験により、球形灰を混和材に用いてもスランプフロー、V漏斗流下時間の値が要求性能を満たす高流動コンクリートの製造が可能であることが示された。

## 4. 硬化性状試験

### 4.1 試験概要

前章では、球形灰を混和材に用いても要求されるフレッシュ性能を満たす高流動コンクリートの製造が可能であることを示した。本章では、フレッシュ性能を満たす球形灰含有高流動コンクリートの硬化性状を、一般に用いられている高流動コンクリートと比較検討する。本研究では硬化性状試験として、強度試験および乾燥収縮ひび割れ試験を行った<sup>6)</sup>。

一般に高流動コンクリート用の混和材として使用されている粉体のうち、高炉スラグは収縮(主に自己収縮)が大きいことが報告されている<sup>7)</sup>。このことから、球形灰を混和材に用いた高流動コンクリートの収縮能力およびひび割れ抵抗性を、高

表-5 硬化性状試験に用いた材料

材 料	特 性
水 (W)	水道水
細骨材 (S)	川砂, 比重: 2.59 吸水率: 2.16%, F.M.=2.63
粗骨材 (G)	石灰碎石, 比重: 2.68 吸水率: 0.43%, 実績率: 58.5%
高性能減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

表-4 硬化性状試験に用いた粉体の物性値

粉体名	記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	メジアン径 (μm)
中庸熟セメント	MPC	3.22	3230	15.95
球形灰	HAY	2.63	2046	12.31
高炉スラグ	BS	2.89	4220	8.47

表-6 硬化性状試験時の配合およびフレッシュ性状

混和材種類	Vw/Vp (%)	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						SP (P×%)	スラング 70-値(cm)	V漏斗 流下時間(s)	KP付着量 (g)
			W	MPC	HAY	BS	S	G				
中庸熟のみ	82.7	25.7	192	748	-	-	732	784	1.00	63.0	20.3	1.7
球形灰	63.1	39.2	164	419	342	-			0.65	66.0	14.5	2.4
高炉スラグ	83.9	52.1	194	372	-	334			0.75	62.0	16.0	2.8

※ Vw/Vp: 水粉体体積比  
P = MPC + HAY + BS (重量)

炉スラグ含有高流動コンクリートと比較検討することとした。また、比較基準として中庸熟ポルトランドセメント単味のケースも検討することとした。実験に用いた粉体の物理的特性およびコンクリートに使用した材料を表-4および表-5に示す。

セメント単味以外のケースでは、中庸熟ポルトランドセメントと混和材の使用比率を体積比で5:5とした。前章で述べた方法により決定したコンクリートの配合を表-6に示す。前章の使用材料とは細骨材の種類が異なっているため、同じ球形灰を用いた場合でも高性能 AE 減水剤の添加量が変化している。打設前のフレッシュコンクリートの試験は、3.3節と同様の方法にて行った。表-6にその結果を示す。中庸熟セメント単味のケースの粘性が若干高かったが、3ケースとも所要のフレッシュ性状を有するコンクリートを製造することができた。

硬化性状試験は、10×10×40cmの供試体を用いた乾燥収縮試験、JIS原案の試験装置を用いた乾燥収縮ひび割れ試験、φ10×20cmの供試体を用いた圧縮強度試験の3種類を行った。供試体数は、強度試験各2本、その他の試験各1本とした。養生方法は、すべて乾燥収縮ひび割れ試験のJIS原案に基づき、7日間封かん養生、以降気中養生とした。乾燥収縮試験では、供試体の重量測定（水分逸散量の測定）とコンタクトゲージによるひずみの測定を適当な時間間隔で行った。乾燥収縮ひび割れ試験では、拘束板のひずみをひずみゲージに

より6時間毎に自動計測した。圧縮強度は、材齢7, 14, 28日の強度を測定した。一連の実験はすべて、温度約20度、相対湿度約60%の室内において行ったが、ひび割れ試験では室温の変動に対する補正を行うため、コンクリートを打設しない型枠における拘束板のひずみを同時に測定し、これを各拘束板のひずみから差し引いた。計測は、全てのコンクリートがひび割れるまで行った。

## 4.2 実験結果および考察

### (1) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果および水分逸散量を図-1、図-2に示す。乾燥収縮量は、高炉スラグ含有、中庸熟単味、球形灰含有の順に大きく、水分逸散量はこの逆の順で大きい結果となった。球形灰はセメントのような激しい水硬性も、高炉スラグのような潜在水硬性も持たないと考えられる。したがって、水和に使用されない水量が多いと予想され、このことが水分の逸散量を他のケースに比べ2倍以上に多くしている要因であると推察される。しかし、水分逸散が多いにもかかわらず収縮量が小さく、水分逸散量のみが収縮に寄与していないことが確認できる。ここで、球形灰含有の収縮量が小さい理由としては、コンクリートの組織（結晶）構造の違いが原因であると考えられる。一般に乾燥収縮は図-3に示すように、コンクリート組織内に残った水分が、移動や蒸発などにより逸散しようとする場合に、水の表面張力とコンクリート組織表面に発生する毛細管張力の相互作用によ

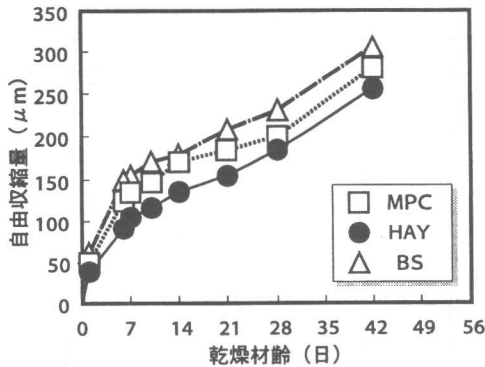


図-1 乾燥収縮試験結果

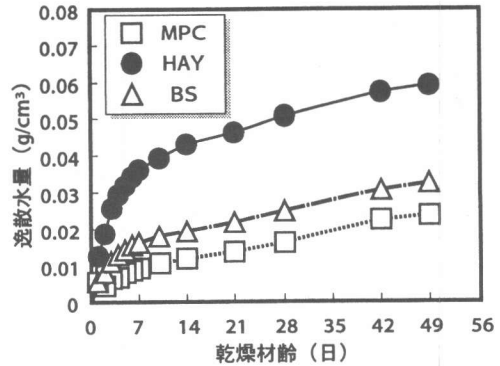


図-2 逸散水量結果

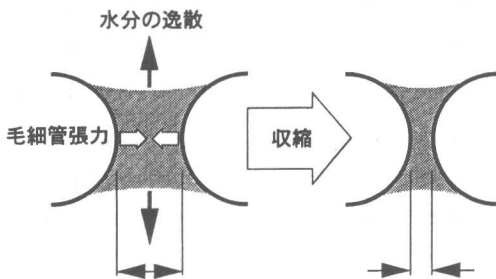


図-3 収縮概念図

り引き起こされると言われている(毛細管張力説)<sup>8)</sup>。毛細管張力は、コンクリート中の毛細管の半径に反比例するため、毛細管径が小さいほど毛細管張力は大きくなり、収縮は大きくなる。表-7に、材齢28日の供試体の破片から、ポロシメータを使用して測定した各コンクリートの細孔径分布測定結果を示す。この結果からわかるように、球形灰含有のケースでは、平均的な毛細管径が大きいため水が抜けやすい、かつ毛細管張力が小さいので収縮しにくいことが予想される。逆に高炉スラグ含有のものは、大きな毛細管張力が働くために収縮が大きいことが考えられる。しかし、この反面組織が雑な球形灰含有配合では、塩分浸透や中性化などが懸念される。

(2) 乾燥収縮ひび割れ試験

図-4に乾燥収縮ひび割れ試験の結果を示す。この図は乾燥材齢と乾燥開始後のコンクリートに作用する引張応力との関係を示したものである。ある時点で引張応力が0以下となり圧縮応力に変化しているのは、ひび割れが発生したことを示している。コンクリートに作用する引張応力は、拘束

表-7 細孔径分布測定結果

混和材種類	全細孔容積 (ml/g)	全細孔面積 (m <sup>2</sup> /g)	平均細孔直径 (μm)
中庸熱のみ	0.0671	15.726	0.0171
球形灰	0.0875	17.191	0.0204
高炉スラグ	0.0768	25.239	0.0122

材との力のつり合いから、次式で求めることができる。

$$\sigma_c = -\frac{\epsilon E A_s}{A_c} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_c$ はコンクリートの引張応力 (MPa)、 $\epsilon$ は拘束板のひずみ、 $E$ は拘束板の弾性係数 ( $2.1 \times 10^5$  MPa)、 $A_s$ は拘束板の断面積 ( $7.97\text{cm}^2$ )、 $A_c$ はコンクリートの断面積 ( $100\text{cm}^2$ ) である。なお、乾燥開始時の拘束板ひずみを0とした。

高炉スラグ含有のケースが乾燥開始から約1週間でひび割れが生じているのに対し、中庸熱単味および球形灰含有のケースでは40日前後までひび割れが生じなかった。このことから高炉スラグを含有させるとひび割れ抵抗性が低下することが確認され、球形灰を含有してもセメント単味の配合と同程度のひび割れ抵抗性を有することが分かった。

各々ひび割れ発生後の応力が0となっていないのは、打設から乾燥開始までの封かん養生期に引張応力が導入されていることを示している。これらの値は、高炉スラグ含有で0.61MPa、中庸熱単味で0.54MPa、球形灰含有で0.33MPaであり、球形灰含有で最も小さい値となった。これはセメントの水和反応に伴う収縮である自己収縮や温度応

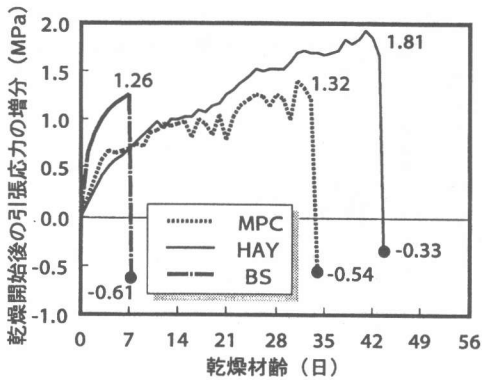


図-4 乾燥収縮ひび割れ試験結果

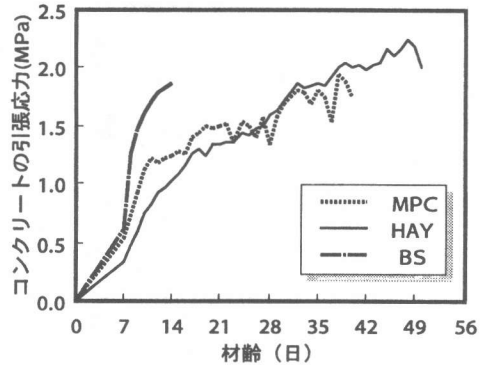


図-5 コンクリートの引張応力

力などが原因であると思われる。

自己収縮で発生していたと考えられるそれぞれのケースでの引張応力を図-4に加算し、ひび割れ発生時までに導入されていた全引張応力と材齢との関係を図-5に示す。ひび割れ発生時に導入されていたと考えられる全引張応力は、高炉スラグ含有で1.87MPa、中庸熟単味で1.86MPa、球形灰含有で2.14MPaとほぼ同程度であった。

乾燥収縮ひび割れ性状にはコンクリートの単位水量の違いが大きく関係していると考えられる。球形灰の場合単位水量が小さいことから収縮量が小さくなるものと推察されるが、高流動コンクリートの場合、フレッシュ性状を満足する配合が非常に限られた範囲に限定されるため、この条件下での比較を行った。以上のことから、コンクリートのひび割れ発生時の全引張応力は同程度であるが、高炉スラグに比較して球形灰含有の場合には自己収縮が小さくかつ強度増進が小さいため、ひび割れが発生するまでにより多い材齢を必要としたものと推察される。

### (3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-6に示す。一般的に強度は、セメント量と水セメント比に支配されるが、高炉スラグのように潜在水硬性などを持つものは付随的な強度発現も期待できる。しかし、先に述べたように球形灰には水硬性が無いと考えられるため球形灰含有のケースの強度は、主にセメント量と水セメント比に支配されると考えられる。本実験の球形灰含有のケースは水セメント比で40%程度であり、28日強度の40MPa程度は一般に用いるコンクリートとして十分な強度であると考えられる。また、強度不足の場合には粉体置換率の調

整で比較的容易に対応できるものと考えられる。

## 5. 球形灰含有配合のフローロスの抑制

### 5.1 試験概要

硬化試験の打設の際、球形灰含有のケースにおいて流動性に大きなロスが見られた。そのためスランプフローの経時変化を測定し、スランプフローロスの状況確認を行った。また、増粘剤を使用し併用系の高流動コンクリートにすることで、スランプフローロスの抑制を試みた。

実験に用いた球形灰含有コンクリートの使用材料および粉体系高流動コンクリートの配合は硬化性状試験時と同じとした。併用系の高流動コンクリートは、練上がり直後のスランプフローが粉体系高流動コンクリートと同程度になるように高性能AE減水剤添加量を1.10%とした。また、増粘剤として生物系水溶性高分子(ウェランガム)を用い、一般的な添加量である水に対して0.05%の添加率<sup>9)</sup>とした。

練上がり直後、および練置き・練返し方式によって30、60分後にスランプフロー試験を行い、スランプロスの状況を確認した。

### 5.2 実験結果および考察

スランプフローの経時変化を図-7に示す。ここで、粉体系高流動コンクリートのスランプフローは、硬化性状試験時よりも大きくなった。これは、細骨材の表面水の状態やコンクリートの温度差の影響により高性能AE減水剤の効果が敏感に反応しているためと考えられる<sup>9)</sup>。粉体系のコンクリートのスランプロスが顕著であるのに比べ、増粘剤を用いた併用系のコンクリートは60分経過後もほとんどスランプロスが見られなかった。一般

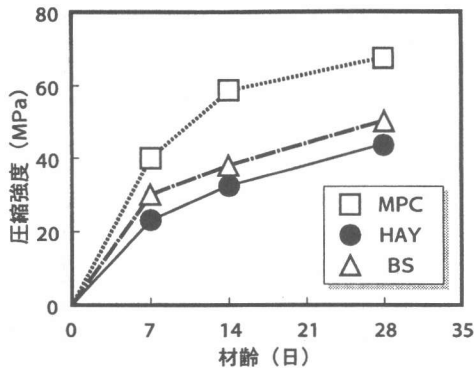


図-6 圧縮強度試験結果

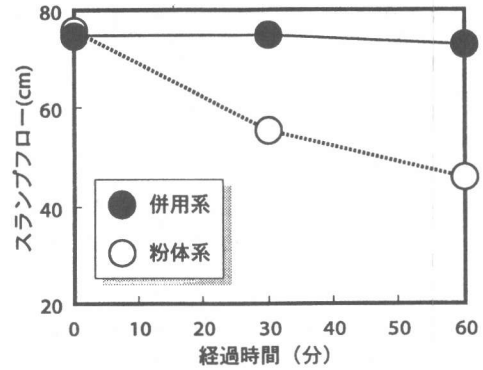


図-7 スランプフローの経時変化

的にスランプロスは、物理的な凝集と化学的な反応の相互作用によると言われている<sup>10)</sup>。しかし球形灰含有の粉体系の配合では極端なスランプロスが生じ、一般に言われているスランプロスとは若干異なるものと考えられる。この原因として、球形灰が水を吸収していることが考えられる。増粘剤を添加した場合、水が高分子のゲル状になり粘性が高くなるため、球形灰が吸水し難くなるとともに高性能 AE 減水剤残存量が増加していることにより、スランプロスを抑制しているものと予想される。

## 6. 結論

本研究では以下の知見を得た。

- (1) 球形灰を混和材として用いて、高流動コンクリートを製造することが可能である。
- (2) 球形灰を含有した高流動コンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状は、高炉スラグ含有および中庸熱ポルトランドセメント単味と同程度である。圧縮強度は他の混和材に比較して低下する。
- (3) 球形灰を用いた粉体系高流動コンクリートのスランプロスは、増粘剤を併用することで改善できる可能性がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、溶融スラグ微粉末を(株)クボタに提供して頂きました。また、実験実施にあたっては、前山篤史氏(長岡技術科学大学大学院修士課程)に多大なご助力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 下水汚泥資源利用協議会:下水汚泥の建設資材利用マニュアル(案), 1991
- 2) 中村博之, 丸山久一, 下村 匠, 桃井清至:廃棄物溶融スラグ粉体の高流動コンクリートへの適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.19, No.1, pp.1129-1134, 1997
- 3) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅:ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993
- 4) 緑川猛彦, 丸山久一, 下村 匠, 中村博之:凝集状態を考慮した粉体の保水能力の評価, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.19, No.1, pp.43-48, 1997
- 5) 皆口正一, 丸山久一, 稲葉美穂子, 坂田 昇:高流動コンクリートの材料分離測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.18, No.1, pp.89-92, 1996
- 6) ひびわれ研究会:コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究《その4》, セメント・コンクリート, No.536, pp.62-71, 1991.10
- 7) 住友大坂セメント株式会社:コンクリート技術講習会テキスト, pp.52-55, 1995.9
- 8) 自己収縮研究委員会:自己収縮研究委員会報告書, 社団法人 日本コンクリート工学協会, pp.51-53, 1996.11
- 9) 坂田 昇, 丸山久一, 南 昌義:増粘剤ウェランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.538/V-31, pp.57-68, 1996.5
- 10) 岡田英三郎:スランプロス・流動化コンクリートの応用, セメント・コンクリート, No.480, pp.32-38, 1987.2