

スラグ系細骨材の表乾状態判定方法に関する研究

○安田 慎吾*1 堀 秀一*1 今本 啓一*2 原品 武*2 山崎 順二*3

要旨： コンクリート用細骨材の表面乾燥飽水状態の判定には、JIS A 1109 のフローコーン法が用いられている。しかし、スラグ系細骨材は天然骨材とは形状や品質が異なり、フローコーン法では表乾状態の判定が難しく困難となる場合が多い。そこで、乾燥質量法を用いて表乾状態を判定し、乾燥質量法と追随性のある静電容量法で簡易に判定する手法を提示した。

キーワード： スラグ系細骨材、表乾状態、含水率、乾燥質量法、静電容量法、フローコーン法

1. はじめに

スラグ系細骨材（フェロニッケルスラグ（以下、FNS）、高炉スラグ（以下、BFS）、銅スラグ（以下、CUS）、電気炉酸化スラグ（以下、EFS）など）は、枯渇する天然骨材の代替骨材として期待されている。コンクリート骨材の特性を試験するため各試験方法が標準化されているが、天然骨材と異なる特性を持つスラグ系細骨材の場合、それらの試験方法による判定が困難になるものもある。その1つが細骨材の表面乾燥飽水状態（以下、表乾状態）の判定である。

そこで、本研究は、スラグ系細骨材の表乾状態を湿潤状態から平衡気乾状態になるまでの質量含水率の経時変化（乾燥質量法）を用いて判定する方法¹⁾を適用し、スラグ系細骨材の含水率を高周波水分計方式（以下、静電容量法）で簡易的に表乾状態を判定する手法を提示し、従来のフローコーン法と比較し、その妥当性について実験的に検証したものである。

2. 乾燥質量法による表乾状態の判定方法

2.1 表乾状態の判定手法

骨材の乾燥時間と含水率の関係を太実線で模式的に表すと図-1のように示される。細骨材の表面に水分が十分に存在する場合は、乾燥速度が一定となる恒率乾燥を示す（直線減少領域）。さらに、細骨材の表面水が蒸発し、細骨材表面に水分がなくなり、細骨材内部が部分的に乾燥した状態になると、乾燥速度が徐々に緩やかになり、乾燥時間-含水率曲線が下に凸の曲線となる（漸減領域）。そして、さらに乾燥が進行し、細骨材が平衡気乾状態になると含水率はほとんど変化せず恒温恒湿室内（温度 20℃、相対湿度 60%）で一定になると考えられる。（一定領域）

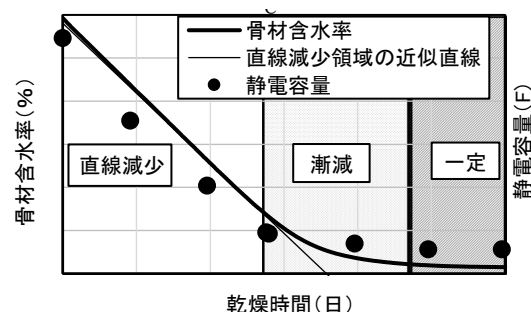


図-1 骨材の乾燥時間と含水率の関係の模式図

乾燥質量法による表乾判定手法については既往の研究²⁾で示されているが、本研究では、骨材含水率の直線減少領域が漸減領域に移り変わる変曲点を細骨材の表乾状態として判定した。なお、直線減少領域の直線勾配については乾燥速度が一定となる範囲で近似している。

2.2 実験方法

各細骨材を 105℃の乾燥炉で絶乾状態にした後、水中に 2 日間浸漬させ湿潤状態とした。乾燥質量法においてはその後、恒温恒湿室内にて乾燥を開始し、細骨材の質量変化の測定を行った。質量変化の測定は、湿潤状態の細骨材を容器（ポリプロピレン製：180×270×40mm）に試料の厚さ 10mm になるまで入れ、電子天秤（最大軽量 2000g、最小 0.01g）にて計測間隔 1 分としてその質量を平衡

*1 大阪兵庫生コンクリート工業組合

*2 東京理科大学

*3 株式会社浅沼組 技術研究所

気乾状態になるまで測定した。なお、測定が終了した試料は再度、105℃の乾燥炉内で絶乾状態とし、乾燥質量法測定中の細骨材含水率を算出した。

ここで、乾燥質量法の乾燥条件の1つとして、乾燥させる骨材量の違いについて容器の大きさを変化させてプレ実験を行った。使用した骨材は、表-1に示すBFSである。使用した容器は、乾燥面を110×120mmとし試料の厚さを10mmとしたものと、乾燥面を180×270mmと一定にし、試料の厚さを10, 20および30mmと変化したものの4種類で実施した。その結果を図-2に示す。これによると、試料の厚さが同一であれば、乾燥面の大きさが異なってもほぼ同様な含水率-乾燥期間の曲線が得られている。一方で、試料の厚さが大きくなると、乾燥速度が緩やかになることが確認できた。また、乾燥速度が緩やかになると、直線減少領域が漸減領域に移り変わる変曲点が高くなっている。これは試料の厚さが厚くなると骨材粒子間に保持される水分が多くなり、自由に蒸発しにくくなることが要因であると考えられる。したがって厚さ30mmの容器の変曲点は骨材全体としての表乾状態よりも高い値を示す可能性があると考えられる。そこで、本実験では乾燥質量法に用いる試料の大きさは乾燥面積180×270mm、厚さ10mmとした。

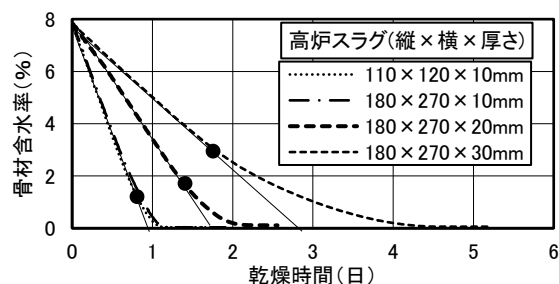


図-2 乾燥質量法の測定容器の大きさによる影響

表-1 使用した細骨材の物性値と表乾判定の測定方法

細骨材の種類	記号	微粒分量(%)	ふるい(F.M.)	測定方法	静電容量測定水準
陸砂	PS	4.7	2.68	乾燥質量法 (骨材の含水量の変曲点を求め表乾判定)	湿潤1 湿潤2 湿潤3 表乾
フェロニッケルスラグ細骨材	FNS	2.9	2.66		
高炉スラグ細骨材	BFS	3.1	2.52		
銅スラグ細骨材	CUS	2.7	2.58	静電容量法 フローコーン法	平衡気乾 (5測定以上)
電気炉酸化スラグ細骨材	EFS	2.0	3.02		

3. 静電容量法^{3), 4)}の測定方法の検討

本実験で使用した測定容器(ポリプロピレン製: 90×140×40mm)や突き棒と高周波水分計(以下、水分計)を写真-1に示す。水分計は、水の少量の変化に対して試料の静電容量(F)が大きく変化すること、細骨材中の水分と静電容量がほぼ比例関係にあることから試料の静電容量を測定することで細骨材の含水状態を測定可能となる。なお、試料は、乾燥質量法と同一の別な容器に同量で同一期間、恒温恒湿室内に静置したものをを用いている。

静電容量法の実験条件として、(1)突き固め方法と(2)測定容器の材質について検討を行った。

(1)突き固め方法の検討: 充填状態を①1層充填突き固め無し、②1層充填15回突き固め、③2層充填各層15回突き固め、④3層充填各層15回突き固めの状態の4水準に変化させ試験を行った。その結果を図-3(a)に示す。容器内の試料の充填率が高くなれば静電容量は、高くなるが突き固め方法の違いのよるばらつきなどは明確には見られない。従って、一定の突き固め条件で一定層に充填すればよいと考えられる。そこで、本実験では、容器高さ40mmに対して、試料を3層に分け、各層を突き棒で15回突き固めることとした。

(2)測定容器の材質の違い: 材質による影響を図-3(b)に示す。アルミニウムおよび

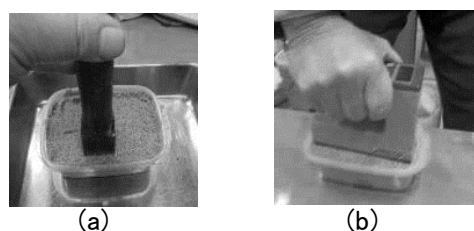


写真-1 静電容量法の試験状況

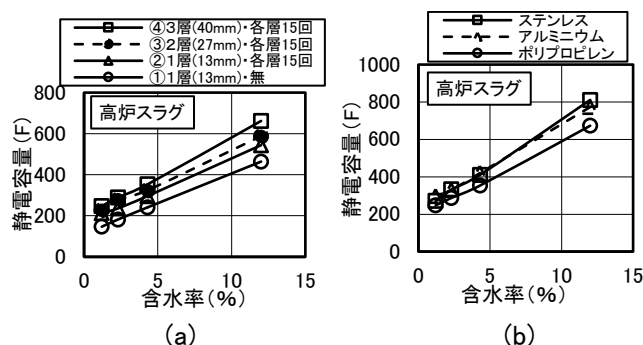


図-3 静電容量法 試料の突き固め方法と測定容器の材質の違い

びステンレスなどのメタルでは、静電容量がポリプロピレンと比べて 15%程度高く測定容器の材質によって静電容量に影響を及ぼす。ここでは、ポリプロピレン容器を用いることとした。

4. 使用した細骨材と表乾判定の測定方法

使用した細骨材の物性値と表乾判定の測定方法を表-1 に示す。細骨材として、陸砂（以下、PS）、FNS、BFS、CUS および EFS の 5 種を使用し測定方法は、細骨材の表乾状態の判定には乾燥質量法を用い、細骨材の質量変化に伴い、静電容量法とフローコーン法でそれぞれ測定した。また、静電容量法では、それぞれ骨材の静電容量を、湿潤 1、湿潤 2、湿潤 3、表乾および平衡気乾状態の 5 水準以上で測定した。乾燥質量法および静電容量法は上述した実験方法を用いた。フローコーン法は、乾燥質量法の比較用試験方法として、JIS A 1109 に準拠し、微粒分を除去することなく実施した。同一資料において、3 回の表乾状態判定試験を行った。なお、フローコーンで表乾状態判定した試料は、静電容量の測定も実施した。

5. 実験結果および考察

5.1 乾燥質量法による結果

各細骨材の含水率測定結果を図-4、図-5、図-6、図-7 および図-8 において太実線で示す。各骨材の直線減少領域の近似直線を細実線で示し、漸減領域に移り変わった点を表乾状態として判定した。その判定した箇所を点線で示している。

図から陸砂（図-4）、フェロニッケルスラグ細骨材（図-5）および高炉スラグ細骨材（図-6）は、表乾状態を示す変曲点で曲線がなだらかになり気乾状態になっているのに対し、銅スラグ細骨材（図-7）および電気炉酸化スラグ細骨材（図-8）は、表乾状態を示す変曲点から、短い時間ですぐに気乾状態になっている。これは、銅スラグ細骨材および電気炉酸化スラグ細骨材の表乾状態時の含水率（吸水率）が小さいことを示している。

5.2 静電容量の測定結果

乾燥時間の経過に伴う静電容量の結果を図-4、図-5、図-6、図-7 および図-8 において黒丸で示す。なお、乾燥質量法で表乾状態と判定した時点の静電容量を図中の四角で示している。

図から乾燥による静電容量の経時変化も乾燥質量法と同様に湿潤状態から一定の勾配で静電容量が減少し、乾燥質量法で表乾状態と判定した変曲点から静電容量の減少が穏やかになっている。銅スラグ細骨材および電気炉酸化スラグ細骨材は、

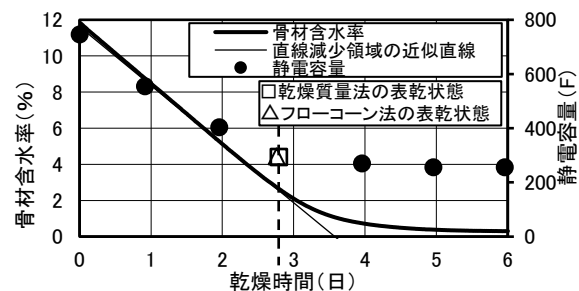


図-4 陸砂の乾燥時間と骨材含水率および静電容量

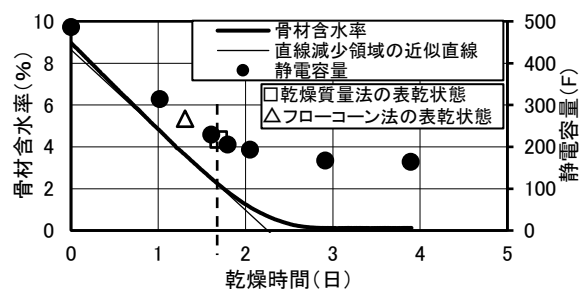


図-5 フェロニッケルスラグの乾燥時間と骨材含水率および静電容量

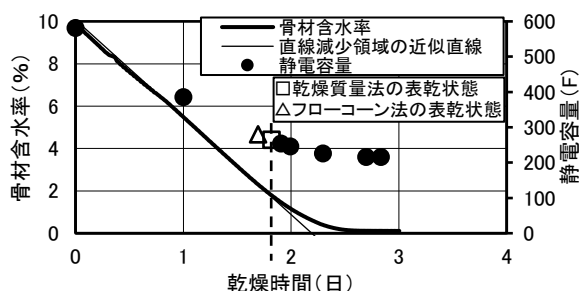


図-6 高炉スラグの乾燥時間と骨材含水率および静電容量

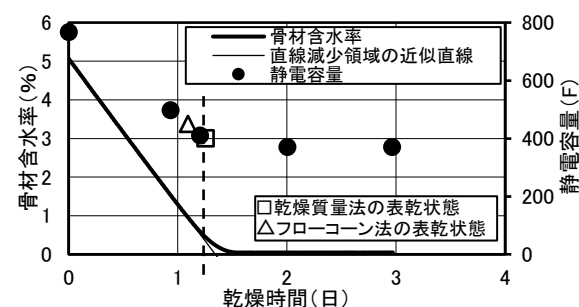


図-7 銅スラグの乾燥時間と骨材含水率および静電容量

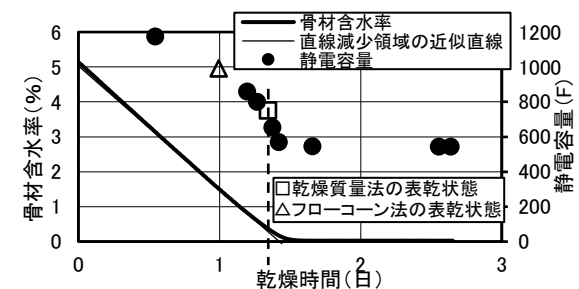


図-8 電気炉酸化スラグの乾燥時間と骨材含水率および静電容量

他の細骨材に比べて静電容量が高めとなった。これらの細骨材に含まれる鉄酸化物の影響が要因の1つとして考えられる。

このように表乾状態と判定した時点の静電容量の値は細骨材の種類によって異なるが、乾燥質量法により表乾状態を判定し、その時の静電容量の値を把握することで、各細骨材の表乾状態判定の目安になることが考えられる。なお、スラグ系細骨材においては、製造工場の違いならびに同一製造工場においてもロットの違いによるばらつきも考えられるため、今後はこれらの要因についても検討を行う必要がある。

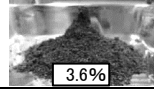
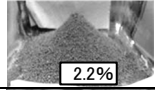
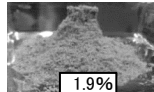
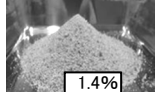
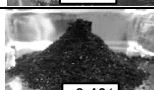
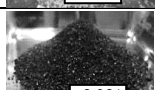
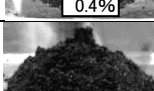
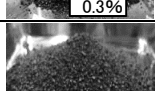
5.3 フローコーン法で得られた表乾状態の判定

フローコーン法で得られた表乾状態の判断状態を表-2に示す。また、フローコーン法で表乾状態として判定した箇所を図-4、図-5、図-6、図-7および図-8に三角で示す。スラグ系細骨材は、表-1に示すように陸砂より微粒分が少なく取り除かれており崩れやすくなっている。銅スラグおよび電気炉酸化スラグは、粒子の質量が大きく（密度が高く粒子体積が大きい）表面水が存在している湿潤状態でも試料が崩れることがある。

5.4 乾燥質量法とフローコーン法の表乾判定の結果

乾燥質量法とフローコーン法で得られた細骨材の表乾状態判定の測定値を図-9に示す。陸砂に関しては、乾燥質量法とフローコーン法で表乾状態を判定した時の静電容量が一致しており、乾燥質量法ならびにフローコーン法の有用性が確認できた。一方、スラグ系細骨材は、フローコーン法で得られた静電容量が乾燥質量法で得られた静電容量より10~30%高くなっている。スラグ系細骨材は、表面性状がガラス質のものや形状が球に近く、かつ密度も高いものがあるため湿潤状態でもすべりやすい状況にあると仮定すると、フローコーン法では、静電容量が高くなると考えられる。

表-2 各骨材のフローコーンでの表乾状態

	図中三角部分の状態 吸水率(%)	図中四角部分の状態 吸水率(%)
フェロニッケルスラグ	 3.6%	 2.2%
高炉スラグ	 1.9%	 1.4%
銅スラグ	 0.4%	 0.3%
電気炉酸化スラグ	 1.5%	 0.4%

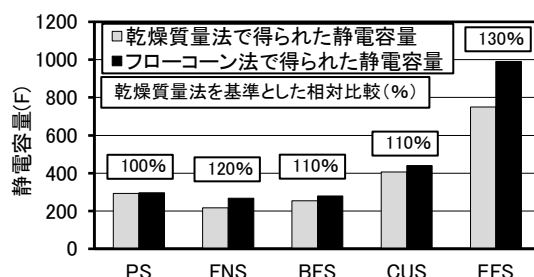


図-9 乾燥質量法とフローコーン法で得られた細骨材の表乾状態判定の測定値

6. まとめ

スラグ系細骨材を含む5種類の細骨材を使用した実験を行い、表乾状態を乾燥質量法とフローコーン法とで比較して以下の知見が得られた。

乾燥質量法での骨材含水率の変曲点で得られた表乾状態の静電容量は、フローコーン法で得られた表乾状態の静電容量と異なった。

乾燥質量法は、スラグ系細骨材の表乾状態を適切に判定できると思われる。そして、乾燥質量法における静電容量は、乾燥質量法とよい追随性を見せた。そのことによって、静電容量法によってスラグ系細骨材の表乾状態を判定できる可能性があると考えられる。

なお、乾燥質量法における骨材量を含む乾燥条件については、今後の標準化に向けて検量線の作成を引き続き検討する予定である。

参考文献

- 1) 川村政史, 笠井芳夫: ソイルセメントコンクリート製造のための土の見掛けの表乾状態試験方法に関する実験研究, コンクリート工学論文集, 第7巻第1号, pp. 103-112, 1996. 1
- 2) 佐藤嘉昭, 永松静也, 竹田吉紹: コンクリート用細骨材の表乾状態の判定方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp. 214-219, 1992
- 3) 鈴木猛, 田畑雅幸, 沓掛文夫, 廣瀬享, 服部梢, 平野彰彦: 静電容量式水分計による各種細骨材とモルタルの測定に関する実験的研究 (その1, 細骨材実験), 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道), pp605-606, 2004, 8
- 4) 岩瀬裕之: 高周波容量式水分計による細骨材の表乾判定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 49-54, 2005