

論文 細骨材の密度・吸水率測定法に関する比較研究

黒井登起雄^{*1}・松村 仁夫^{*2}・宮澤 伸吾^{*1}

要旨：コンクリート用細骨材は、種類の多様化に伴い表面乾燥飽水状態の判定に生ずる個人差など、JIS 試験方法の限界が指摘されている。本研究は、細骨材の密度および吸水率測定を JIS 法、減圧吸水による方法、乾燥速度法、電気抵抗による方法、遠心脱水による方法などによって実験し、結果を比較検証するとともに、試験方法の適性を照査した。また、減圧吸水による方法における微粒分の取扱についても検討した。研究の結果から、JIS 法、減圧吸水による方法、乾燥速度法、電気抵抗による方法などは、密度および吸水率がほぼ同じになること、細骨材微粒分は無視できるほど吸水率が小さいことを明らかにした。

キーワード：細骨材、表乾状態、密度、吸水率

1. まえがき

近年、コンクリート用細骨材は、川砂の枯渇に伴い、山砂、海砂、砕砂の使用増加、さらに高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグなど産業副産物の使用などにより、多様化の傾向が顕著である。このようにコンクリート用細骨材の種類の多様化に伴って、表面乾燥飽水状態（表乾状態）の判定に生ずる個人差など、JIS 試験方法（JIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」）の限界が指摘されている。著者らは、1996 年度から細骨材の表乾判定に着目し、減圧吸水法による細骨材の絶対容積測定に基づく密度および吸水率試験方法について基礎的に研究を進めてきた。細骨材の密度および吸水率試験方法には、減圧吸水による細骨材の絶対容積測定に基づく方法の他に、今まで①遠心力、②溶解熱、③乾燥速度、④比誘電率、⑤電気抵抗、⑥食塩水濃度などによる試験方法も提案されている。これらの試験方法は、それぞれ測定原理が異なるために、同一の細骨材の場合においても、細骨材の密度および吸水率の値が相違するものと考えられる。そこで、本研究では、細骨材の密度および吸水率を①JIS 法（フローコーンによる方法）、②減圧吸水による細骨

材の絶対容積測定に基づく方法、③遠心力（遠心脱水）による方法、④電気抵抗の変化による方法、⑤乾燥速度の変化による方法で求め、その値を比較検証するとともに、試験方法の適性を照査した。また、減圧吸水による方法における粒径 0.15mm 未満の微粒分の取扱についても検討した。

2. 各種試験方法による細骨材の密度、吸水率の比較検証

2.1 使用材料

細骨材は、コンクリート用細骨材として一般に使用されている以下の代表的な 6 種類を選定した。

- (1) 川砂（鬼怒川産）、(2) 砕砂（栃木県葛生産）、(3) フェロニッケルスラグ細骨材（FNS5-0.3, T社製〈電炉風砕〉）、(4) 銅スラグ細骨材（CUS2.5, CUS1.2, N社製）、(5) 再生細骨材（葛西製、大阪製）、(6) 超軽量細骨材

2.2 実験方法

細骨材の密度および吸水率試験は、以下に示す各種方法によって行なった。

- (1) JIS A 1109（細骨材の密度及び吸水率試験方法）

*1 足利工業大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科（正会員）

JISA 1109 に規定されている「フローコーン」によって細骨材の表乾判定を行ない、置換法によって密度を測定した。試料の量は、約 500 g とした。

(2) 減圧吸水による細骨材の絶対容積測定に基づく方法^{1,2)}

減圧吸水による方法²⁾は、① 絶対乾燥状態にした細骨材の減圧吸水実験からの「減圧処理時間と見掛けの絶対容積との関係」の作成(図-1)、② 「減圧処理に伴う見掛けの絶対容積の変化」(図-2)からの表乾状態に相当する骨材(表乾相当状態と称する)の見掛け絶対容積の決定、③細骨材の密度および減圧吸水率の計算、の順序で行った。②の表乾相当状態における骨材の見掛け絶対容積の決定、すなわち、表乾相当状態の判定は、絶対容積の減少速度が急激に小さくなり、0.1ml/min.以下になる時間を目安に行った。細骨材の表乾密度 d_s (g/cm³)、絶乾密度 d_d (g/cm³)、見掛けの真密度 d_t (g/cm³) および減圧吸水率 Q (%) は、式 [1] ~ 式 [4] によって計算した。

$$d_s = (W_d + q) / V_s \dots\dots\dots [1]$$

$$d_d = W_d / V_s \dots\dots\dots [2]$$

$$d_t = W_d / V_{24} \dots\dots\dots [3]$$

$$Q = (q / W_d) \times 100 = \{ (V_s - V_{24}) / W_d \} \times 100 \dots\dots [4]$$

ここで、 W_d ; 絶乾状態の質量 (g)、 q ; 吸水量 (g)、 V_s ; 減圧吸水で巻き込み気泡を排除した絶対容積(表乾状態の絶対容積に相当)、 V_{24} ; 減圧吸水 24 時間後の絶対容積

なお、減圧処理は、真空定温恒温器を用いて、圧力-90.7kPa (試験開始後 90 分まで)で行った^{1), 2)}。試料の量は、約 500 g とした。

(3) 遠心力(遠心脱水)による方法^{3,4)}

遠心力による方法は、表乾状態の試料を JISA 1802 に従って作製し、JISA 1109 に準じて密度および吸水率を求めた。試料の量は、約 100 g とした。

(4) 電気抵抗の変化による方法⁵⁾

電気抵抗の変化による方法は、以下に示す吸

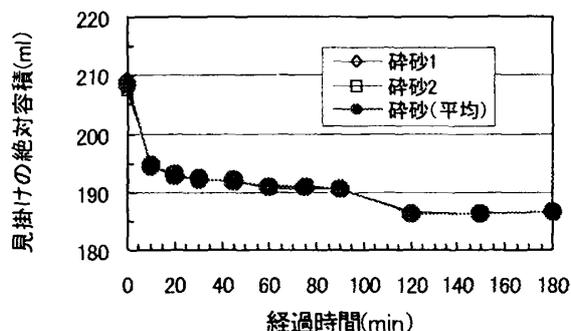


図-1 見掛けの絶対容積の経時変化の一例

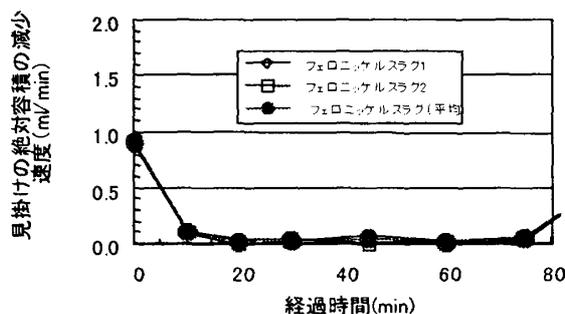


図-2 見掛けの減少速度と処理時間との関係の一例

水率測定と、それとは別のピクノメータによる密度測定から構成されている。

① 吸水率の測定および計算

吸水率の測定は、以下の順序で行った。

a) 乾燥過程において、表面水が存在する範囲で 3 水準、表面水が存在しない範囲で 3 水準の試料を準備する。

b) それぞれの試料を内寸法 40×40×100mm(40×40mm の銅版電極を配置) の電気抵抗値測定容器に充填し、アナログテスターで電気抵抗値を測定する。なお、試料の量は、約 300 g とし、それぞれに塩化ナトリウムを 5 g 程度加えた。

c) 式 [5] によって求めた 6 水準の試料の含水率 Z_i (%) と電気抵抗値 (kΩ) との関係プロットし、高含水率と低含水率の範囲をそれぞれ直線近似する。

$$Z_i = \{ (m - m_d) / m_d \} \times 100 \dots [5]$$

ここで、 m ; 乾燥前の試料質量 (g)、

m_d ; 乾燥後の試料の質量 (g)

この 2 直線の交点に対応する含水率を表乾状態の試料の吸水率 Q (%) とする。

② 密度の測定および計算

試料の密度は、以下の手順で行った。

- a) 予め準備した乾燥過程における表面水の付着した試料約 500 g を分取し、その質量を目量 0.1 g の秤で精確に測定 (m_1) する。
- b) ピクノメータに試料と水を入れ、空気を追い出した後、その質量 (m_3) を測定する。
- c) 試料の表乾密度 d_s (g/cm^3) は、式〔6〕によって求めた。

$$d_s = \{ \rho_w (1+Q) m_1 \} / \{ (1+Q) m_1 - (1+Z) (m_3 - m_2) \} \dots [6]$$

ここで、 ρ_w ; 試験時の水の密度 (g/cm^3), m_2 ; ピクノメータに水を満たした質量 (g), Q ; 吸水率測定で求めた吸水率, Z ; 密度測定に使用した試料の含水率

(5) 乾燥速度の変化による方法⁶⁾

乾燥速度の変化による方法は、試料の最初の乾燥の段階において乾燥速度が一定になることに着目したもので (図-3), 乾燥による含水率の変化から吸水率を求める試験と、それとは別の密度試験から構成されている。

① 吸水率の測定および計算

吸水率の測定は、以下の手順で行った。

- a) 表面水が付着した状態の試料約 200 g を赤外線水分計 (株式会社科学研究所製) を用いて乾燥させ、1 分間隔で質量変化を目量 0.01 g の直示天秤で求める。
- b) 試料質量の変化が一定になったとき終了し、105°C の乾燥器で乾燥させて絶乾状態の質量を測定する。
- c) 「含水率と乾燥時間との関係」を図にプロットし、初期の直線部分と乾燥の後半の直線部分を最小二乗法によって直線近似する (図-4)。
- d) 吸水率は、2 つの近似直線の交点を通る y 軸に平行な直線と「含水率-経過時間」曲線が交わる点で求めた。

② 密度の測定および計算

- a) 試料を 24 時間乾燥させた (絶対乾燥状態) 後、質量測定し、JIS A 1109 に準じて密度試験を行う。
- b) 試料の表乾密度 d_s (g/cm^3) は、式〔7〕

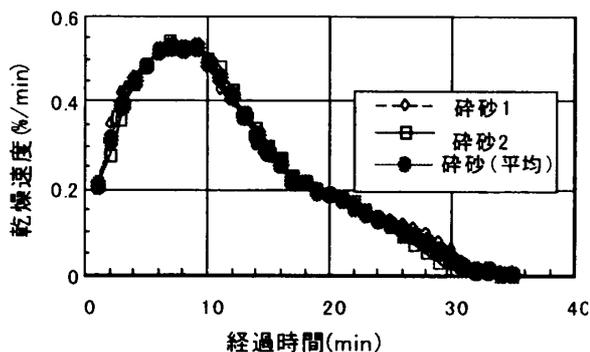


図-3 乾燥速度と経過時間との関係

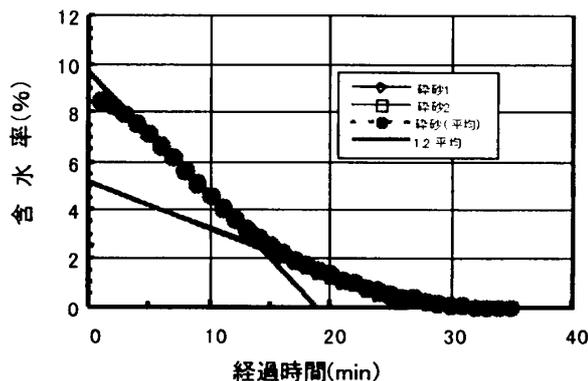


図-4 含水率の経時変化

によって求めた。

$$d_s = (W_d + q) / (m_1 + W_d + q - m_3) \dots [7]$$

ここで、 W_d ; 絶乾状態の試料の質量 (g), q ; 乾燥速度法で求めた試料の吸水量 (g), m_1 ; 500ml (または 250ml) の目盛まで水を満たしたフラスコの質量 (g), m_3 ; 試料と水で 500ml (または 250ml) の目盛まで満たしたフラスコの質量 (g)

2.3 結果および考察

図-5 (川砂, 碎砂, 再生細骨材) および図-

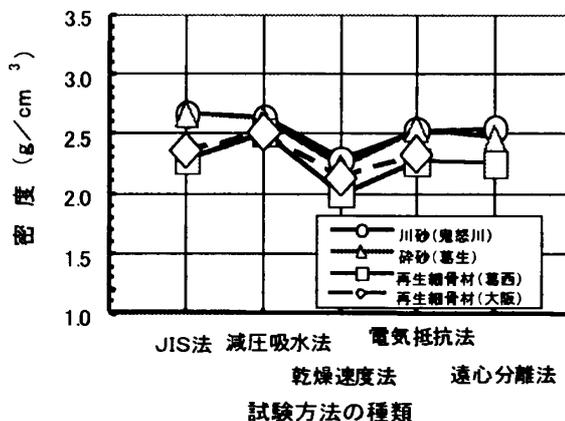


図-5 各種試験法による密度試験結果

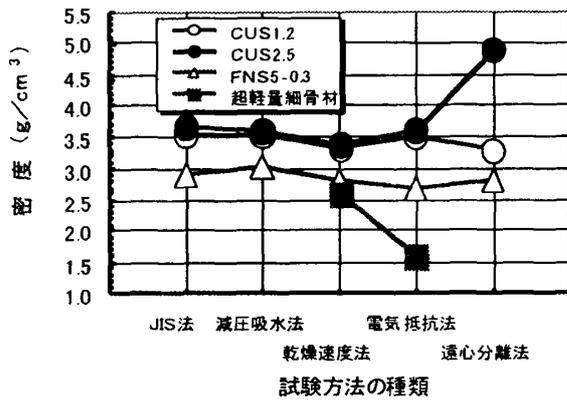


図-6 各種試験法による密度試験結果

6 (銅スラグ細骨材, フェロニッケルスラグ細骨材, 超軽量細骨材) は, JIS 法, 減圧吸水法, 乾燥速度法, 電気抵抗法および遠心分離法の各種試験方法による密度の測定値を細骨材毎に比較して示した。図-5 より, 川砂と砕砂の密度は, JIS 法と減圧吸水法および電気抵抗法と遠心分離法がそれぞれほぼ同じ値 (約 2.63 および約 2.55 g/cm³) で測定される。しかし, 乾燥速度法の場合, これらの細骨材の密度は, 2.3 g/cm³ で, 若干小さく測定される。再生細骨材の密度は, 川砂, 砕砂の場合とほぼ同じ傾向が認められるが, 減圧吸水法の場合に若干大きく, 乾燥速度法の場合に若干小さく測定される傾向も見受けられる。また, 図-6 より, 銅スラグ細骨材 (CUS-1.2, CUS-2.5) の JIS 法, 減圧吸水法, 乾燥速度法および電気抵抗法における密度は, ほぼ同じように測定されるが, 遠心分離法の場合, 銅スラグ細骨材 CUS-2.5 の測定値は, 非常に大きくなった。これは, 試験時に微粒分によって表乾状態が適切に作製できなかったために生じた結果と考えられる。

図-7 および図-8 は, JIS 法, 減圧吸水法, 乾燥速度法, 電気抵抗法および遠心分離法の各種試験方法による吸水率の測定値を細骨材毎に比較して示した。図より, 川砂, 砕砂およびその他の細骨材の吸水率は, 再生細骨材ほど大きく変わらないが, JIS 法より 0.5~3% の範囲内で若干大きくなる傾向がある。しかし, 再生細骨材 (葛西および大阪) の場合, 試験法により吸水率の測定値は, 大きく違う傾向が認められる。

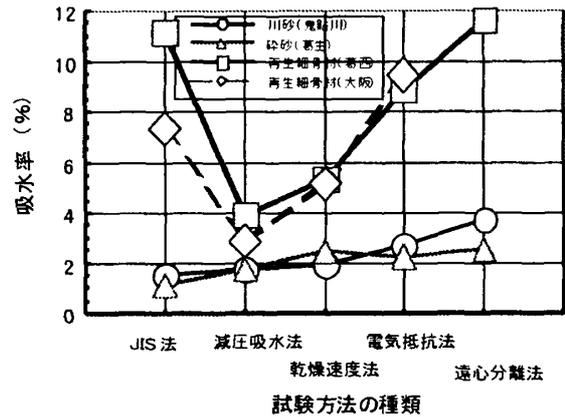


図-7 各種試験法による吸水率試験結果

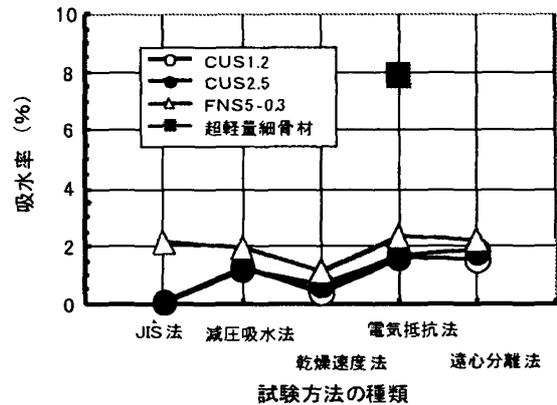


図-8 各種試験法による吸水率試験結果

これは, 再生細骨材に多くのペーストが含まれていること, ペーストが細骨材粒にかなり付着していること, ペースト微粒が含まれていることなどが大きく影響しているものと考えられる。なお, 図-6 および図-8 より, 超軽量細骨材の密度および吸水率は, 超軽量である (水に浮いてしまう) ために水の置換法で行なう試験方法の場合, 測定できなかった。今後, 適切な溶液を用いる試験方法などを検討する必要がある。

3. 細骨材の微粒分の取扱いに関する検討

3.1 実験概要

減圧吸水法による細骨材の密度および減圧吸水率に及ぼす微粒分量の影響をガラスビーズのモデル細骨材によって検討した結果⁷⁾, 微粒分の分散方法等に問題があったことから, エタノール (密度 <20°C> 0.789~0.791 g/cm³) を用いる置換法によって検討した。

① モデル細骨材 (ガラスビーズ) およびダス

ト；モデル細骨材は、0.15mm以上の細骨材がモデル化でき、かつ、吸水率が0%となるガラスビーズ（密度；2.46 g/cm³）を選定した。粒度は、細骨材を模擬するため、FM=3.24に調整した。

② ダスト；ダストは、粒径を0.15mm未満、0.075~0.15mm, 0.075mm未満にした碎石（硬質砂岩）ダスト、銅スラグダスト、再生細骨材ダストの3種類とした。それぞれのダストの密度を表-1に示した。

表-1 各種ダストの密度試験結果

ダストの種類	粒径 (mm) / 密度 (g/cm ³)		
	0.15 未満	0.075-0.15	0.15 以上
碎石ダスト	2.75	2.70	2.72
銅スラグ	3.74	3.73	3.72
再生細骨材	2.46	2.49	2.48

③ ダストを混入した実験試料は、所定量（約190ml）のガラスビーズに各粒径の微粒分を加えて準備した。ダスト混入量は、0, 25g（5%）、50g（10.9%）、75g（15.6%）、115g（25.7%）および200g（37.6%）の6水準とした。

ダストを混入したガラスビーズ試料の見掛けの絶対容積の測定は、減圧吸水法によるエタノールの置換法によって行った。実験試料は、1水準3個とした。ダストを混入したガラスビーズ試料の密度は、式〔1〕および式〔3〕によって求めた。

3.2 実験結果および考察

図-9は、ダスト混入率毎のガラスビーズの密度とダスト混入率との関係を示した。図-9より、碎石、銅スラグおよび再生細骨材ダストを混入した場合、表乾相当状態を判定して算定した密度は、いずれの混入率においても、計算値より若干大きくなるが、ほぼ計算値と一致する。密度は、計算値の-0.04~+0.04 g/cm³の範囲である。しかし、再生細骨材ダストを混入したガラスビーズの密度の場合、他のダストに比べ変動が大きいようである。なお、24時間後にお

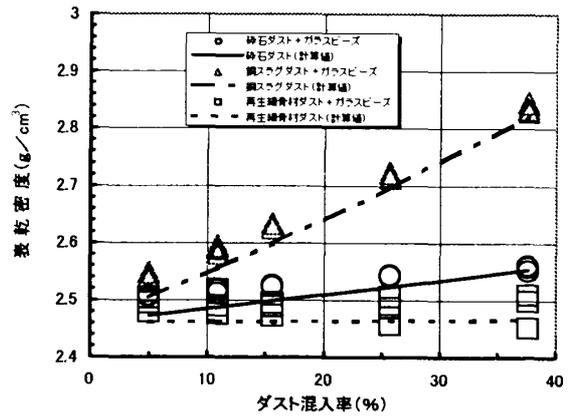


図-9 ダスト混入率と表乾密度との関係

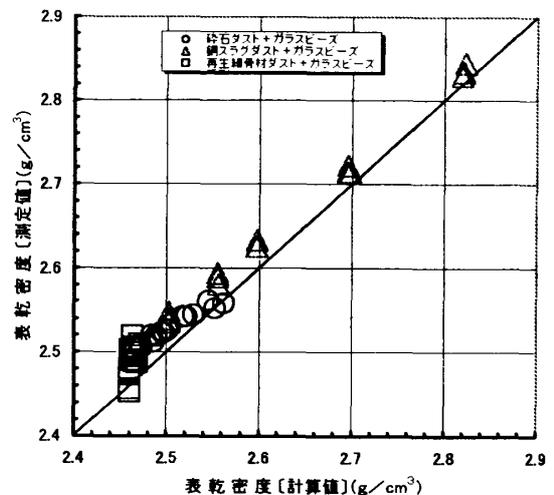


図-10 表乾密度の測定値と計算値の相関 (碎石ダスト)

ける各ダストを混入したガラスビーズの密度は、図-9および図-10ともにほとんど同じであった。このときの各ダストの吸水率を計算すると表-2に示すように、各ダストとも吸水率は、非常に小さく、無視してもよいと考えられる。こ

表-2 各種ダストの平均吸水率

ダストの種類	粒径 (μm) / 吸水率 (%)		
	0.15 未満	0.075-0.15	0.15 以上
碎石ダスト	0.08	0.05	0.10
銅スラグ	0.11	0.04	0.09
再生細骨材	0.06	0.11	0.09

のように、微粒分を含む細骨材の場合、ダストの吸水率は、無視してもよい位小さいので、微粒分を多く含む細骨材の場合の表乾状態の判定および密度、吸水率試験は、微粒分を取除いた

試料で試験するのも方法の一つと考えられる。

4. まとめ

本研究では、細骨材の密度および吸水率を① JIS法(フローコーンによる方法)、②減圧吸水による細骨材の絶対容積測定に基づく方法、③遠心力(遠心脱水)による方法、④電気抵抗の変化による方法、⑤乾燥速度の変化による方法で求め、その値を比較検証した結果、川砂、砕砂、銅スラグ細骨材、フェロニッケルスラグ細骨材は、どの試験方法においても同じ値を示したが、再生細骨材試験法によって異なる結果を示した。特に、吸水率の値の違いが大きかった。

また、微粒分を含む細骨材の場合、ダストの吸水率は、無視してもよい位小さく、微粒分を多く含む細骨材の場合、表乾状態の判定および密度、吸水率試験は、微粒分を取除いた試料で試験するのも方法の一つと考えられる。

参考文献

- 1) 黒井登起雄ほか;減圧吸水による細骨材の見掛け容積測定法に関する基礎研究,土木学会第23回関東支部技術研究発表会講演概要集,1996.3
- 2) 黒井登起雄ほか;減圧吸水による細骨材の密度および吸水率測定に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21,Na2,pp.31-36,1999.7
- 3) JIS A 1802;コンクリート生産工程管理用試験方法(遠心力による細骨材の表面水率試験方法)
- 4) 吉兼亨ほか;遠心脱水による細骨材の表面乾燥飽水状態について,土木学会論文集,第396号/V-9,pp.151-158,1988.8 ほか
- 5) 上野敦ほか;細骨材の表乾状態判定方法に関する基礎的検討,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.18,Na1,pp.423-428,1996.6
上野敦ほか;電気抵抗値による細骨材の吸水率決定方法に関する基礎的研究,土木学会論文集,第613号/V-42,pp.137-146,1999.2
- 6) 佐藤嘉昭ほか;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,Na46,pp.214-219,1992
- 7) 黒井登起雄ほか;減圧吸水法による細骨材の密度測定に及ぼす微粒分の影響,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22,Na2,pp.265-270,2000.7