論文 再生細骨材を用いたコンクリートの流動特性について

麓 隆行^{*1}·長峰 慎^{*2}·木利 将之^{*3}·山田 優^{*4}

要旨:再生骨材を用いたコンクリートの流動性に関する研究は少ない。そこで本研究では, 再生コンクリートの流動特性を把握することを目的とし, プレーンなモルタルおよびコン クリートにおける単位水量と流動性の関係に及ぼす再生細骨材使用の影響を調べた。その 結果,再生細骨材使用の場合には,配合設計の際に骨材の粒径ごとの粒子密度を考慮する 必要があること,モルタルフローとペースト膜厚,またスランプと余剰ペースト膜厚との 相関が高いことがわかった。

キーワード:再生細骨材,モルタルフロー,スランプ,ペースト膜厚,余剰ペースト膜厚

1. はじめに

近年,再生骨材を用いたコンクリートに関す る研究,特に強度や耐久性,管理手法に関する 研究が多い。筆者らも前報¹⁾で,強度に関する一 つの指標を提案した。しかし,コンクリートで の強度や耐久性に加えて施工性を確保するには, 適正な流動性を持つ範囲で最小の単位水量とす る必要があるが,流動性に関する検討はまだ不 +分である。

本研究では、再生細骨材を用いたコンクリー トの流動特性を把握することを目的とし、W/C を一定とした混和剤を用いないモルタルおよび コンクリートでの単位水量を変化させた場合の 流動性を試験した。特に、再生細骨材の体積基 準での粒度分布および比表面積に着目し、それ らと流動性との関係を考察した。

2. 再生細骨材を用いたモルタルの流動性

2.1 実験に用いた細骨材

普通細骨材として, 揖斐川産川砂(以下, NRm) および高槻産硬質砂岩砕砂(以下, NCm)の2 種類を用いた.また,昭和32年建設(解体時平 均圧縮強度32.9N/mm²)および昭和33年建設(同 25.9N/mm²)の建築物の解体現場で入手したコン クリート塊をジョークラッシャおよびコーンク ラッシャを用いて25mm以下の大きさに破砕し た後,0.15~2.5mmの粒径範囲の部分を回収し, 再生細骨材とした。モルタル実験に用いる際に は,各細骨材の粒度分布を質量基準でNRmの粒 度に調整し,それぞれ再生細骨材RFm1および RFm2とした。また,RFm1をNRmの体積基準 の粒度分布に調整した再生細骨材 RFv1 も用意 した。表-1に細骨材の物理的性質を示す。なお, 骨材全体に各粒径の粒子が占める割合を質量で

分類	記号	絶乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粒形判定実 積率(%)	粗粒率	Sb (m²/g)	$\frac{\text{Ss}}{(\text{cm}^2/\text{cm}^3)}$	V _{0.6}	備考
普通	NRm	2. 55	2.46	65.2	60. 7	2. 70	1.49	141.3	0.375	揖斐川産川砂
細骨材	NCm	2.62	1.77	65.6	58.0	2.69	2. 43	156. 2	0.373	高槻産砕砂
再生 細骨材	RFm1	2.00	12.4	69.3	58.9	2.68	5.96	168.7	0. 405	建築物(S.32)
	RFv1	2.00	12.4	70.8	58.9	2.79	4. 70	145. 2	0.364	
	RFm2	2.10	9. 77	67.6	59. 2	2.69	2. 40	164.4	0. 409	建築物(S.33)

表-1 モルタル実験に用いた細骨材の種類

ただし, Sb は BET 吸着法, Ss は沼田式から算出した比表面積, V_{0.6} は粒径 0.6mm 以下の粒子が占める体積

*1 大阪市立大学大学院助手 工学研究科都市系専攻 修(工)(正会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻

*3 大阪市立大学 工学部土木工学科

*4 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 工博(正会員)

示した従来の粒度分布を質量基準,また体積で 示した粒度分布を体積基準とした.

2.2 再生細骨材の各粒径のペースト付着率 および体積基準での粒度分布

普通細骨材の密度は粒径に関係なく,ほぼ一 定であるが,再生細骨材では粒径が小さいほど 旧ペースト付着量が多く、粒子密度は小さい。 モルタルの流動性には、細骨材の粒度分布の影 響も考えられるため、再生細骨材中のペースト 付着量および密度の分布を把握する必要がある。 そこで、ペースト付着量を以下の方法で測定し た。まず,再生細骨材を JISA 1102 に準じてふる い分け、粒径ごとに 5%濃度の塩酸水溶液に浸し た。その後,反応が停止するまでの約1ヶ月間, 1日置きに溶液を交換した。細骨材全体および各 粒径でのペースト付着率 a および arは, 浸す前 の質量と溶解後の質量との差から求めた。ここ で、rはふるい目の呼び寸法を示す。次に、JISA 1202 により塩酸処理後の細骨材粒子の密度を測 定し,その平均値を原細骨材の絶乾密度ρ_{os}とし た。以上の値を用い、原細骨材および付着ペー ストの絶乾密度を粒径に関係なく一定と仮定し, 式(1)~(4)から各粒度の密度 ρ₁を求めた。

$$(1 - a/100) \rho = \rho_{os} V_s$$
 (1)

$$\rho = (1 - V_s) \rho_p + V_s \rho_{os}$$
(2)

$$(1 - a_r/100) \rho_r = \rho_{os} V_{sr}$$
 (3)

$$\rho_{\rm r} = (1 - V_{\rm sr}) \rho_{\rm p} + V_{\rm sr} \rho_{\rm os} \tag{4}$$

ここで、 V_s は骨材全体に占める原骨材の体積割 合、aは骨材全体のペースト付着率(%)、 ρ は骨 材全体の絶乾密度(g/cm³)、 V_{sr} はふるい目の呼び 寸法 r にとどまる粒子に占める原骨材の体積割 合、 ρ_{os} は原骨材の絶乾密度(g/cm³)、 ρ_{p} は付着 ペーストの絶乾密度(g/cm³)、 ρ_{r} はふるい目の呼 び寸法 r にとどまる粒子の絶乾密度(g/cm³)、 a_{r} はふるい目の呼び寸法 r にとどまる粒子のペー スト付着率(%)である。

求めた各粒径での密度を用い,ふるい分け試 験結果から体積基準での粒度分布を算出した。



再生細骨材の粒径とペースト付着率および絶乾 密度との関係を図-1に、質量基準で NRm の粒 度に調整した RFm1 および RFm2 の体積基準で の粒度分布を図-2に示す。既往の研究結果と同 様に粒径が小さいと、ペースト付着率が高い。 また,再生細骨材全体の吸水率が増加すると, すべての粒径でのペースト付着率が増加した。 粒径 1.2-2.5mm の粒子ではペースト付着率が 20%程度であるが、粒径 0.15-0.3mm の粒子では 40%以上となった。その結果,密度は粒径 1.2-2.5mmの粒子では2.2g/cm³程度であるのに対 し、 粒径 0.15-0.3mm の 粒子では 1.7 g/cm³ 程度ま で低下した。質量基準で NRm の粒度に調整した 再生細骨材 RFm1 および RFm2 の体積基準での 粒度分布は、NRm に比べ骨材全体の吸水率が高 いほど粒径 0.6mm 以下の粒子の体積が増加した。

2.3 モルタル実験の概要

各細骨材について,絶乾密度,吸水率,粒度, 実積率および粒形判定実積率を JIS A 1109, JIS A 1102, JIS A 1104 および JIS A 5005 に従って試験 した。また、窒素ガスを用いた BET 吸着法によ る BET 比表面積 S_b および粒径 0.074~0.15mm の 球体の比表面積を 558cm²/cm³ と仮定した Powers の考えに基づく沼田式²⁾ (5)および式(6) による比表面積 S_s を測定した。なお、角張り係 数 $1/\rho$ は各粒径で一定とした。

$$S_s = 558 \sum \left(\frac{1}{\varphi} \frac{1}{2^i} \frac{P_r}{100} \right) \tag{5}$$

$$\frac{1}{\varphi} = 1 + 4(0.64 - \frac{G}{100}) \tag{6}$$

ここで, *S*_sは細骨材の比表面積(cm²/cm³), *i* は粒 径 r mm の粒子の単一粒径での粗粒率, *P*_rは粒径 r mm の粒子が細骨材全体に占める体積百分率 (%), 1/*φ*は角ばり係数, *G* は粒径判定実積率(%) である。

モルタルの配合は、W/C=50%で一定とし、単 位水量を変化させたコンクリートの配合から、 粗骨材を取り除いた表-2に示すとおりとした。 各種の細骨材を用いる際は体積置換とし、NRm と再生細骨材を質量比1:1に混合した場合も検 討した。なお、混合した細骨材の物理的性質は、 実用性を考慮し、各骨材の物理的性質と混合比 から算出した。モルタルは、普通ポルトランド セメントおよび細骨材を30秒撹拌後、練混ぜ水 を投入し、3分間練混ぜて作製した。練り上がり 直後に、JIS R 5201に準じて落下させずに測定し たモルタルフロー(以下、0打モルタルフロー)お よび空気室圧力方法による空気量を測定した。

2.4 細骨材の物理的性質とモルタルの流動 性との関係

細骨材の物理的性質の相関分析を行い,互いの影響度を表-3に示した。BET比表面積は,吸水率や実積率との関係があり,*S*。は式(5)と(6)から分かるとおり,粒径判定実積率と関係がある。

次に、単位水量の変化とモルタルのフレッシュ性状との関係を図-3~5 に示す。空気量との 関係では、骨材により傾向が異なるが、各骨材 での変動は、0~3%程度と小さい。質量基準で同

表-2 モルタルの基本配合(NRm の場合)

W/C	単位容積(kg/m ³)					
(%)	W	C	S			
	277	555	1380			
50	290	580	1326			
50	302	604	1275			
	314	627	1225			

表-3 細骨材の物理的性質に関する相関分析

$\overline{}$	吸水率	実積率	G	Sb	Ss
吸水率	1.000	-	_	_	—
実積率	0. 937	1.000	—	—	-
G	0.006	-0. 025	1.000	—	—
Sb	0. 794	0. 827	-0. 234	1.000	-
Ss	0. 399	0. 209	-0. 736	0. 423	1.000

G は粒径判定実積率, Sb は BET 比表面積, Ss は沼田式 による比表面積



一粒度に調整した場合,0打モルタルフローでは, 単位水量の増加とともに直線的に増加し,再生 細骨材の吸水率が大きいほど流動性が低下した。 しかし,同程度の吸水率でもRFv1を用いた場合, RFm1を用いた場合より0打モルタルフローが大



きく、NRmと同程度の流動性が得られた。すな わち、粒径ごとに密度が異なる再生骨材を用い る場合には、体積基準での粒度分布の把握が重 要であることがわかった。

2.5 ペースト膜厚とモルタルの流動性との 関係

単純に総ペースト体積を骨材の全表面積で除 した値を求め、これをペースト膜厚として 0 打 モルタルフローとの関係を検討した。骨材の総 表面積の推定には、BET 比表面積を用いた S_bま たは沼田式(5)を用いた S_sを使用した。図-6 お よび図-7に示すとおり、BET 比表面積を用いた 場合、骨材ごとのペースト膜厚と 0 打モルタル フローとの相関は高いが、各骨材間での差が大 きい。これに対し、沼田式を用いた場合、細骨 材の種類に関係なくほぼ一直線上に近似でき、 相関係数も高い値を示した。すなわち、モルタ ルの流動性には、再生細骨材の微細な凹凸の影 響は小さいと考えられる。



図-8 沼田式による比表面積から求めた余剰ペー スト膜厚と0打モルタルフローとの関係

次に、余剰ペースト理論の適用について検討 した。この理論は、コンクリートおよびモルタ ルでは、充填状態の骨材間空隙がペーストで満 たされ、さらに余剰ペーストの存在により骨材 が分散、流動性が付与されるという考え方であ る。ここでは、余剰ペースト膜厚を下記の式(7) および(8)²⁾を用いて算出した。ただし、細骨材の 比表面積の推定には、沼田式(5)を用いた。

$$P_e = P_a - F(100 - C_v)/C_v \tag{7}$$

$$t_a = P_a / (SF) \tag{8}$$

ここで、 P_e は余剰ペースト体積(ℓ/m^3), P_a はモル タル中の総ペースト体積(ℓ/m^3)、Fは単位細骨材 体積(ℓ/m^3)、Sは比表面積(m^2/ℓ)、 C_v は細骨材の実 積率(%)、 t_p は余剰ペースト膜厚(μm)である。

その結果,図-8のとおり,余剰ペースト膜厚 の増加とともに,0打モルタルフローが直線的に 増加するが,同じ余剰ペースト膜厚でも骨材密 度が大きいほどフロー値が大きくなった。再生 細骨材を用いたモルタルの流動特性にも余剰ペ ースト理論は適用できるが、骨材密度など他の 影響も大きいと考えられる。本実験では余剰ペ ースト膜厚よりもペースト膜厚の場合に 0 打モ ルタルフローと相関性が高い結果となった。

3. 再生コンクリートの流動性

3.1 実験概要

使用材料は、普通ポルトランドセメント、高 槻産硬質砂岩砕石(絶乾密度 2.63g/cm³、吸水率 1.07%、実積率 60.3%)および表-4に示す普通細 骨材 2 種類および再生細骨材 2 種類である。モ ルタル実験で用いた骨材と同種であるが、粒度 調整をせずに使用した。表-5に示す配合を用い、 各種細骨材の適用を体積置換によって行った。 セメント、細骨材および粗骨材を 30 秒撹拌後、 練混ぜ水を投入し、3 分間練混ぜて、コンクリー トを作製した。練り上がり直後にスランプと空 気量を測定した。

3.2 ペースト膜厚とコンクリートの流動性 との関係

空気量の試験結果は、図-9に示すとおりに単 位水量による影響は小さく、砕砂(NCc)では少し 小さい場合もあったが、ほぼ2±1.0%程度で一 定と考えられる。スランプについては、モルタ ルの場合と同様に、ペースト膜厚および余剰ペ ースト膜厚とスランプとの関係を調べた。細・ 粗骨材の総表面積の算出には沼田式を用いた。 コンクリート中の余剰ペースト体積は、西堀ら ³⁾の考えを参考に、コンクリート中のモルタル体 積と粗骨材の実積率から、式(7)と同様に余剰モ ルタル体積を算出後、その余剰モルタル体積中 の余剰ペースト体積を求める方法で算出した。

その結果,図-10および図-11に示すとおり, ペースト膜厚ではスランプとの相関性があった が,骨材間の差が大きく,その影響要因は明確 ではない。しかし,モルタルの時とは逆に,余

表-5 コンクリートの基本配合(NRc の場合)



ト膜厚とスランプとの関係

分類	記号	絶乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粒形判定実 積率(%)	粗粒率	Sb (m²/g)	$\frac{\text{Ss}}{(\text{cm}^2/\text{cm}^3)}$	V _{0.6}	備考
普通	NRc	2. 52	2.74	66.3	60. 7	2.88	1.33	131.8	0.346	揖斐川産川砂
細骨材	NCc	2.59	2.07	64. 2	58.0	2.85	3.19	146.6	0.341	高槻産砕砂
再生	RFc1	1.99	11.39	65.6	59. 2	2. 61	4. 29	163.5	0. 435	建築物(S.32)
細骨材	RFc2	2.17	7.51	64.4	57.3	2. 24	3.87	224. 3	0. 562	建築物(S.33)

表-4 コンクリート実験に用いた細骨材の種類

ただし, Sb は BET 吸着法, Ss は沼田式から算出した比表面積, V_{0.6}は粒径 0.6mm 以下の粒子が占める体積

剰ペースト膜厚との関係において,骨材の種類 にかかわらず直線的な関係になった。

3.3. 再生細骨材の比表面積計算手法の検討

以上より,再生細骨材を用いる場合,体積基 準の粒度分布から求まる比表面積が重要なこと が分かった。しかし,その算出には粒径ごとの ペースト付着率の測定が必要であり,迅速な判 断は難しい。再生細骨材全体のペースト付着率 は吸水率と関係することから,吸水率を用いて 表面積を推定する方法を検討した。

まず,式(5)の P_r を,ふるい分け試験から求めた粒径rmmの粒子が骨材全体に占める質量百分率 M_r とした次式(9)から S_m (cm²/cm³)を計算した。 さらに,式(10)から,吸水率の割合だけ割り増しした S_{mv} を算出した。

$$S_m = 558 \sum \left(\frac{1}{\varphi} \frac{1}{2^i} \frac{M_r}{100} \right) \tag{9}$$

$$S_{mw} = S_m (1 + w/100)$$
(10)

ここで、 S_m は式(5)の $P_r \& M_r \&$ して求めた比 表面積(cm^2/cm^3)、 M_r は粒径 r mm の粒子が骨材 全体に占める質量百分率(%)、 $1/\varphi$ は式(6)による 角ばり係数、 S_{mw} は $S_m \&$ 吸水率だけ割り増しし た比表面積(cm^2/cm^3)、w は吸水率(%)である。

S_{mw} および *S_m* とコンクリートおよびモルタル 実験で用いた再生細骨材の *S_s* との関係を調べた。 **図-12** に示すとおり,比表面積が大きいほど, *S_m* と *S_s* との差は大きくなるが,吸水率で割り増 しした *S_{mw}* では,*S_s* とほぼ同じ値となった。以上 から,従来の質量基準の粒度分布と吸水率から, 簡易的に再生骨材の比表面積 *S_s* を推定できる可 能性が示唆された。だが,データが少ないため, 今後さらに実験を重ねて精度を確認したい。

4. 結論

- (1)再生細骨材は粒径により粒子密度が異なるため,質量基準の粒度分布が同じでも,体積基準では 0.6mm 以下の粒子が多くなる。
- (2)体積基準での粒度分布を同じにすると,再生 細骨材を用いたモルタルの流動性は普通細骨



材を用いた場合とほぼ等しくなる。

- (3)0 打モルタルフローはモルタルのペースト体 積と細骨材総表面積の比(ペースト膜厚)と, スランプは余剰ペースト膜厚と相関が高い。
- (4)再生骨材の体積基準での粒度分布から求めた 比表面積は、質量基準での粒度分布から求め た値と吸水率から推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 麓隆行ほか: 再生細骨材の物理的性質がコンク リート性状に及ぼす影響, コンクリート工学 年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1233-1238, 2002.
- 2)松下博通ほか:コンクリートの配合設計への余 剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.578/V-37, pp.57-70, 1997.
- 3)西堀忠信ほか:骨材の形成する空隙と流動性に 関する研究,セメント技術年報, No.32, pp.14 8-151, 1978.