

論文 細骨材の一部を砕石粉に置換したモルタルの乾燥収縮について

溝口 達也*1・麓 隆行*2・高見新一*3・熊野知司*4

要旨：近畿地方では、多様な骨材の利用を迫られており、その対応策を検討すべく、JCI 近畿支部にて、「性能評価型コンクリートに向けた骨材調査研究委員会」を立ち上げた。その検討内容の一つとして、本研究では、コンクリートの保存期間 4 週の初期乾燥収縮ひずみへの細骨材中の微粒分の影響を調べるため、6 種類の微粉末を混入したモルタルの性状を調べた。その結果、モルタルの乾燥収縮ひずみに、砂岩系微粉末の表面の粗さの影響と、微粉末の混入によるペースト体積の増加や細孔構造の変化とが影響することがわかった。

キーワード：砕砂、砕石粉、モルタル、乾燥収縮、モルタルフロー、圧縮強度、曲げ強度

1. はじめに

コンクリートを長期的に使用するために、その耐久性が重要となる。なかでも乾燥収縮は、あらゆる劣化を促進するひび割れに関係が深い。その乾燥収縮ひずみに影響する要因の一つとして、コンクリート用骨材に注目が集まっている。骨材自体の収縮が、コンクリートの乾燥収縮ひずみの一因と考えられるからである¹⁾。

近畿地方では、天然骨材の枯渇から様々な種類の骨材が使用されており、特にコンクリート用細骨材として、天然の川砂、陸砂、海砂そして輸入砂が利用されてきた。しかし、その供給が難しくなり、今後、砕砂や副産物細骨材の利用が増加する傾向にある。そのため、日本コンクリート工学会近畿支部では、「性能評価型コンクリートに向けた骨材調査研究委員会」を立ち上げ、砕石、砕砂、および各種スラグ細骨材も対象とし、骨材の品質とコンクリートおよびモルタルの性状との関係について調査してきた。2009 年度の実験結果として、細骨材の微粒分がモルタルの乾燥収縮ひずみに影響する可能性を示した²⁾。本研究では、その結果を受けて、細骨材の微粒分がコンクリート乾燥収縮に及ぼす影響を調べるため、砕石粉等の微粉末を混入したモルタル性状を調べた。

2. 実験概要

2.1 微粉末の物理的性質に関する試験概要

本研究では、砂岩系 3 種類（砂岩 A、砂岩 B、砂岩 C）、石灰岩系 3 種類（石灰岩 A、石灰岩 C、石灰岩 D）、合計 6 種類の微粉末を用いた。砂岩系は、異なる産地での砕砂製造過程において乾式で採取された微粉末である。石灰岩 A は、製造された石灰石砕砂を 0.15 mm でふるい、通過した微粉末である。そして、市販されている粒度の異なる石灰岩 C および石灰岩 D を準備した。

微粉末の物理的品質として密度、粒度および表面積について調べた。密度を JIS A 1202「土粒子の密度試験」に準じて、また粒度をレーザー回折式粒度計により測定した。表面の特性を表す表面積として、球形比表面積、透過法比表面積および BET 比表面積を算出した。

球形比表面積 A_s は、粒子形状を球形と仮定し、粒度に基づいて算出した表面積である。透過法比表面積 A_p は、JIS R 5201 にあるブレン空気透過法により求めた比表面積である。さらに BET 比表面積 A_b は、77K の温度下で窒素を用いたガス吸着試験により求めた比表面積である。以上の比表面積は、その試験方法の特徴から、微細な凹凸の評価に差が出るため、 A_s 、 A_p 、 A_b の順に大きくなる。その他に、粒子形状や表面の凹凸を表す指標として、粒子形状を表す「形状表面積比 A_p/A_s 」、表面の凹凸を表す「粗さ表面積比 A_b/A_p 」、そして球に対する形や凹凸を含めた粗さを表す「球対表面積比 A_b/A_s 」を算出した。

2.2 モルタル性状に関する試験概要

微粉末の他に、普通ポルトランドセメント、水道水、標準砂およびポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。微粉末を、標準砂の一部と質量で 0、5、10 および 15% 置換したモルタルを作製した。配(調)合条件として $W/C=55\%$ 、 $S/C=3.5$ 、混和剤の添加量を $(C+F)\times 0.5\%$ とした。実験に用いたモルタルの配(調)合を表-1 に示す。練混ぜには、オムニミキサを使用し、空練りとして、セメントと標準砂および微粉末を低速 30 秒練り混ぜて、水を投入後、低速 30 秒、高速 90 秒、計 120 秒攪拌した。練混ぜ直後の性状として JIS R 5201 に準じた手法でモルタルフローの 0 打および 15 打の両方を測定した。また、硬化後の性状試験のために $40\times 40\times 160\text{mm}$ の試験体を 9 本作製した。翌日、脱型直後の試験体寸法と質量から試験体密度を算出し、配(調)合から算出した配(調)合密度との差

*1 近畿大学 大学院総合理工学研究科環境系工学専攻 (学生会員)

*2 近畿大学 理工学部社会環境工学科 講師(正会員)

*3 大阪産業大学 工学部都市創造工学科 講師 (正会員)

*4 摂南大学 理工学部都市環境工学科 教授 (正会員)

表-1 モルタルの配(調)合の一例

W/C (%)	S/C	細骨材質量に対する置換率(%)	単位量(kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	微粉末 F	混和剤 SP((C+F)×%)
55	3.5	0	251	456	1596	0	0.5
55	3.5	5	251	456	1516	80	0.5
55	3.5	10	251	456	1436	160	0.5
55	3.5	15	251	456	1356	239	0.5

表-2 使用した微粉末の物性

種類	密度 (g/cm ³)	メディアン径 D ₅₀ (μm) *1	球形比表面積 ² A _s (cm ² /g)	透過法比表面積 ³ A _p (cm ² /g)	BET比表面積 A _b (m ² /g)	形状表面積比 A _p /A _s	粗さ表面積比 A _b /A _p	球対表面積比 A _b /A _s
普通セメント	3.15	—	—	3493	—	—	—	—
砂岩A	2.72	43.8	2037	2848	6.67	1.40	23.41	32.72
砂岩B	2.72	39.2	1839	2204	8.59	1.20	39.00	46.74
砂岩C	2.65	36.9	1623	2177	2.64	1.34	12.14	16.29
石灰岩A	2.71	16.7	3147	3256	0.91	1.03	2.81	2.90
石灰岩C	2.70	42.8	1018	2298	0.47	2.26	2.05	4.63
石灰岩D	2.70	26.9	2975	4162	0.64	1.40	1.55	2.17

*1: 微粉末の粒度で、累積割合が50%となる粒径のこと。 *2: 粒子を球形と仮定して粒度から算出した比表面積

*3: プレーン空気透過試験器を用いて測定した比表面積。一般にプレーン値、JISでは粉末度と呼ぶ。

から、試験体の空気量を推定した。その後、4本を20℃の水槽で材齢28日まで養生し、曲げ強度試験と圧縮強度試験に用いた。残りの5体を20℃の水槽で7日間養生後、乾燥収縮試験に用いた。保存条件は、室温20℃、相対湿度60%とし、JIS A 1129のコンタクトゲージ法に準じて保存期間4週間での長さ変化を測定した。また、曲げ試験後の試験体の一部を5mm角程度に割り、アセトンで24時間浸漬後、水銀圧入法で細孔構造を調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 微粉末の物理的性質に関する試験結果

表-2および図-1に微粉末の物理的試験結果を示す。砂岩系微粉末のメディアン径D₅₀は破碎方法によらず同程度であった。粒度もほぼ同じ曲線となっている。石灰岩系微粉末では、石灰岩Aが少し細かいものの、石灰石砕砂からふるい分けたこともあり、砂岩系と同様の曲率を持った曲線となった。ただ、既製品として製造されている微粉末は、粒度範囲が狭く、曲線の角度が急になっていることがわかる。

透過法比表面積は、砂岩系微粉末および石灰岩Cが同程度となり、石灰岩A、石灰岩Dの順に大きくなった。メディアン径D₅₀が同程度であれば、透過法比表面積は同じになること、メディアン径D₅₀が小さくても粒度により締め固まり具合が透過法比表面積に影響を及ぼすことが推察される。

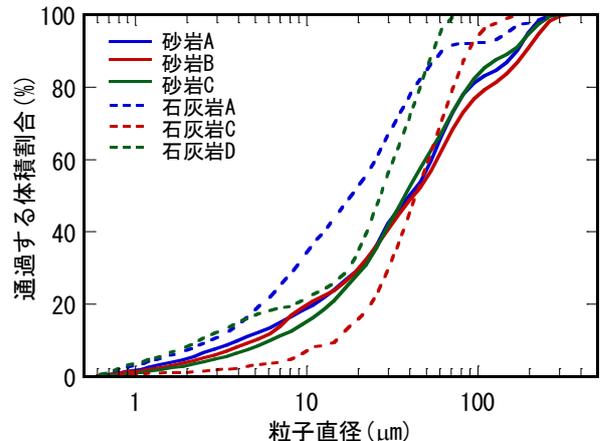


図-1 微粉末の粒度測定結果

また、形状表面積比は、岩種によらずほぼ同じであるが、粗さ表面積比は、砂岩系微粉末が石灰岩系微粉末よりも大きいことがわかる。そのため、球対表面積比も同様の傾向となった。すなわち、粒子形状は同程度であるが、砂岩系微粉末の表面が、石灰岩系微粉末に比べて粗いことが推定される。

以上から、砂岩系微粉末は、粒度曲線の傾きや粒子形状は、石灰石砕砂に含まれる石灰岩系微粉末と同程度だが、表面の凹凸が粗いという特徴を持つことがわかる。

3.2 モルタル性状に関する試験結果

モルタルフローの0打と15打の関係を図-2に示す。微粉末の種類に拘わらず、その関係は指数関数的に変化した。フロー値の範囲は0打で100-175mm、15打で

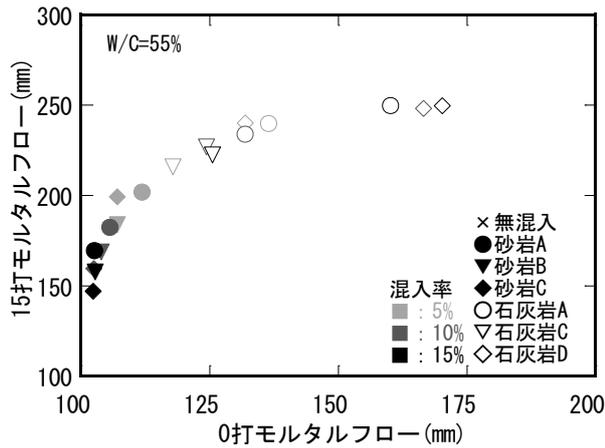


図-2 0打フローと15打フローの関係

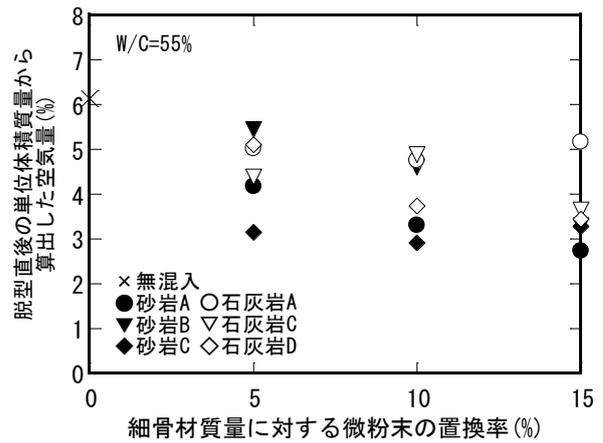


図-4 微粉末の置換率による試験体中の空気量の変化

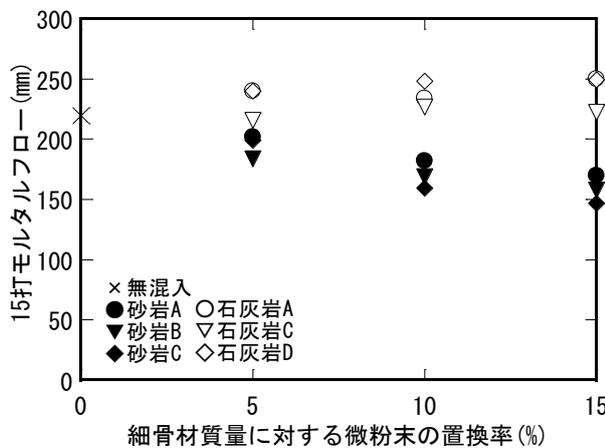


図-3 微粉末の置換率による15打フローの変化

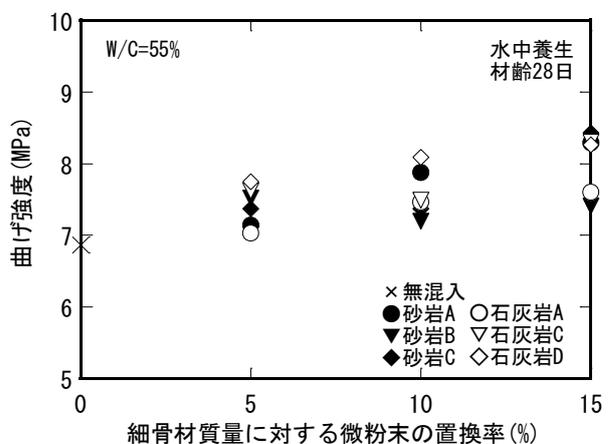


図-5 微粉末の置換率による曲げ強度の変化

150-250mm となり、15打での評価が明解であった。

そこで、置換率による15打モルタルフロー試験の結果を図-3に示す。砂岩系微粉末の場合、置換率が大きくなると、15打モルタルフローが小さくなった。一方、石灰岩系微粉末の場合、置換率が大きいと15打モルタルフローは緩やかに増加する傾向があった。岩種によってモルタルフローが異なることから、モルタルフローには、微粉末の置換率の増加によるペースト量の増加や微粉末の物性が影響したと考えられる。

試験体中の空気量に対する試験結果を図-4に示す。無混入の場合、6.2%程度あった空気量が、砂岩系微粉末や石灰岩系微粉末の置換により、1~4%ほど低下した。微粉末の置換により、空気量は少なくなる傾向にある。微粉末の種類や置換率に拘わらず、空気量は2.5~5.5%の間で変化した。置換率の増加による空気量の変動は、微粉末の種類や物性の影響もあると考えられるが、その傾向は明確にできなかった。

曲げ強度試験および圧縮強度試験の結果をそれぞれ図-5および図-6に示す。砂岩系や石灰岩系に拘わらず、置換率が大きいと、各強度は大きくなった。ただし、その増加割合は、微粉末の種類により異なった。微粉末の

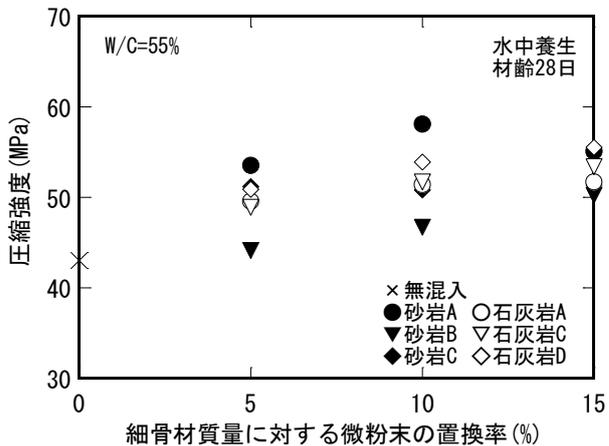


図-6 微粉末の置換率による圧縮強度の変化

置換による、空気量の低下やペースト体積の増加に加え、モルタルの細孔構造が緻密化されたことも考えられる。

保存期間4週の初期乾燥収縮ひずみを図-7に示す。石灰岩D以外の微粉末を用いた場合を除いて、置換率の増加により初期乾燥収縮ひずみは大きくなった。砂岩系微粉末を10%置換した場合、無混入に比べて初期乾燥収縮ひずみは200μ程度大きくなった。これらは、フロー試験や強度試験の結果から、微粉末の物性、細孔構造お

よびペースト体積の増加などの影響と考えられる。

3.3 粗さ表面積比から見た初期乾燥収縮に関する考察

3.1 節で考察したとおり、砂岩系微粉末の主な特徴は粗さ表面積比であった。そこで、図-8に、粗さ表面積比と初期乾燥収縮ひずみとの関係を示す。粗さ表面積比が2.81以下の場合、粗さ表面積比の増加とともに、初期乾燥収縮ひずみが大きくなった。粒子表面の粗さも初期乾燥収縮ひずみに影響するとわかる。しかし、粗さ表面積比2.81以上での変化は明確ではなく、別の影響要因が考えられる。

3.4 細孔構造から見た初期乾燥収縮に関する考察

そこで、次にモルタルの細孔構造から考察することとした。水銀圧入試験の結果を図-9~図-11に示す。

微粉末の置換により、無混入に比べて直径0.2~2 μm の細孔容積の減少や直径0.2 μm 以下の細孔容積の増加が見られた。また、石灰岩Dや砂岩Bを用いた場合に0.03 μm 付近でピークが見られた。

それらの傾向を検討するため、図-12に直径を0.0058~0.05 μm 、0.02~0.05 μm 、0.05~0.2 μm および0.2~2 μm に分けた累積棒グラフを示す。微粉の種類に拘わらず、置換率が大きくなると、直径0.2~2 μm の細孔容積(斜

線)が減少している。遷移帯に多い直径0.05~2 μm の細孔容積(斜線+黒)は、他に比べて砂岩Bへの置換率5%、10%および石灰岩Dへの置換率5~15%で少し少なかった。一方、微粉末の種類や置換率による直径0.02~2 μm の細孔容積(斜線+黒+灰)の差はほとんど見られない。これらから、石灰岩Dや砂岩Bで、粒度や置換条件の影響で細孔が細かい方にシフトしているものの、微粉末への置換により細孔は緻密化するが、遷移帯に多い細孔径(直径

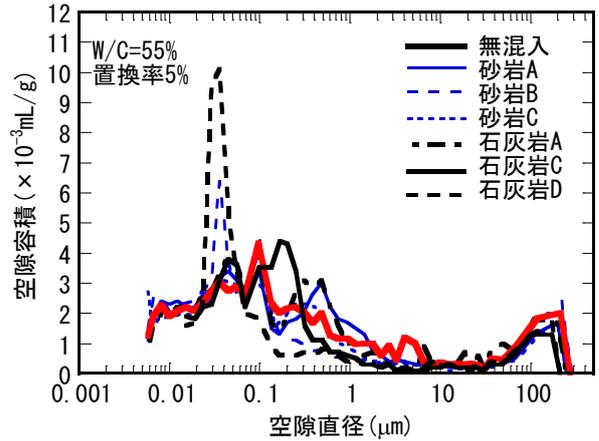


図-9 微粉末で5%置換した場合の細孔径分布

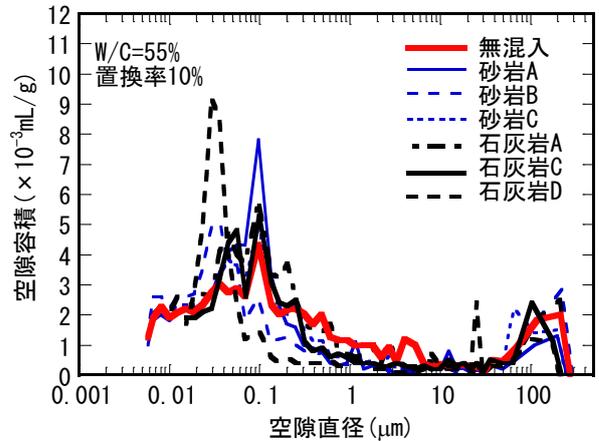


図-10 微粉末で10%置換した場合の細孔径分布

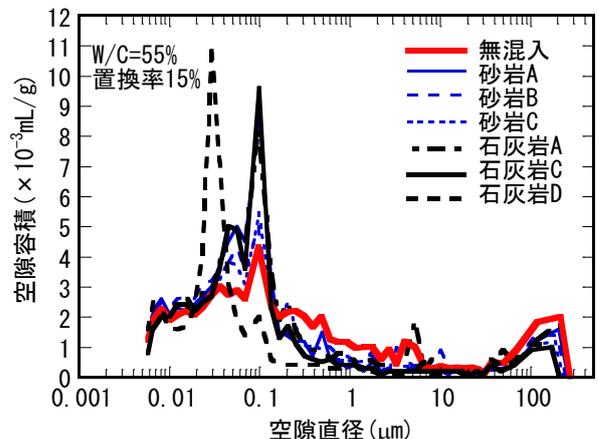


図-11 微粉末で15%置換した場合の細孔径分布

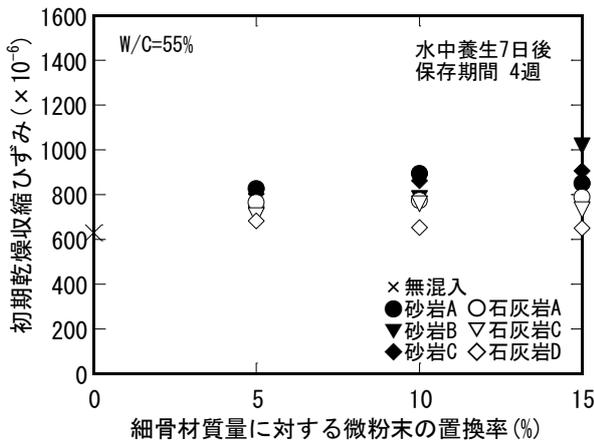


図-7 微粉末の置換率による初期乾燥収縮ひずみの変化

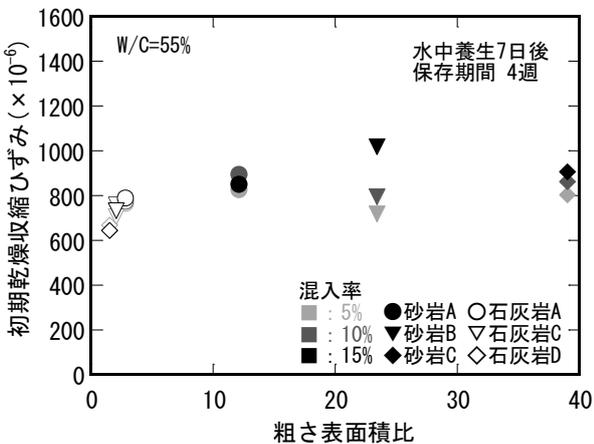


図-8 微粉末の粗さ表面積比による初期乾燥収縮ひずみの変化

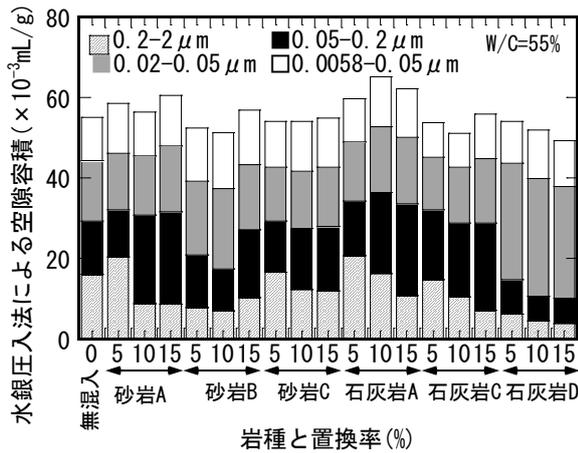


図-12 モルタルの細孔径範囲ごとの容積変化

0.05~2 μm)の容積自体は変化しなかったと考えられる。しかし、各強度や初期乾燥収縮ひずみの結果では微粉末の添加量の影響を受けると考えられ、図-12のように微粉末の置換率が変わっても直径0.05~2 μmの細孔容積が同程度になると考えにくい。すなわち、微粉末の置換による細孔構造の変化以外の、空気量の減少やペースト量の増加が各強度や初期乾燥収縮ひずみの結果に影響を及ぼしたと考えられる。

3.5 微粉末や空気を含んだ単位容積あたりの初期乾燥収縮ひずみに関する考察

標準砂の収縮を無視できるとすれば、モルタルの初期乾燥収縮ひずみの要因は、ペーストに着目すればよいこととなる。そこで、単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみ ϵ_{pa} を算出した。

$$\epsilon_{pa} = \frac{1000 \epsilon_s}{V_w + V_c + V_a} \quad (1)$$

ここに、 ϵ_{pa} : 単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 ϵ_s : 初期乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 V_w : モルタル 1m^3 中の水の体積(L)、 V_c : モルタル 1m^3 中のセメントの体積(L)、 V_a : モルタル 1m^3 中の空気の体積(L)である。

単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみと微粉末の単位体積との関係を図-13に、また単位ペースト体積中の0.05~2 μmの細孔量との関係を図-14に示す。ここで、単位ペースト体積中の細孔量とは、モルタル中の細孔径分布はペーストのみに起因すると考え、モルタルに占める配(調)合上のペースト体積および測定した空気体積から算出した、ペーストのみの単位体積あたりの細孔量である。

石灰岩系微粉末の場合、微粉末の単位体積が増加しても単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみに変化

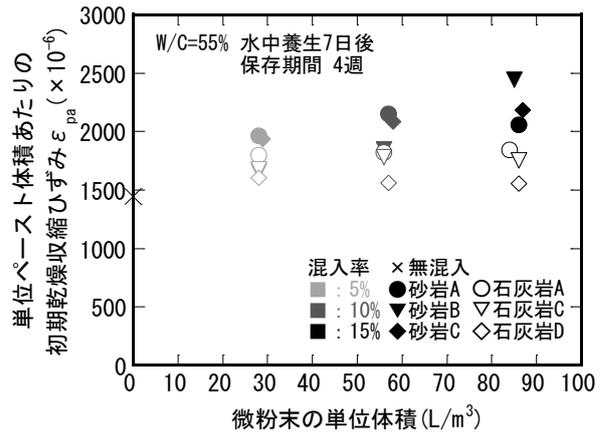


図-13 単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみと微粉末の単位体積との関係

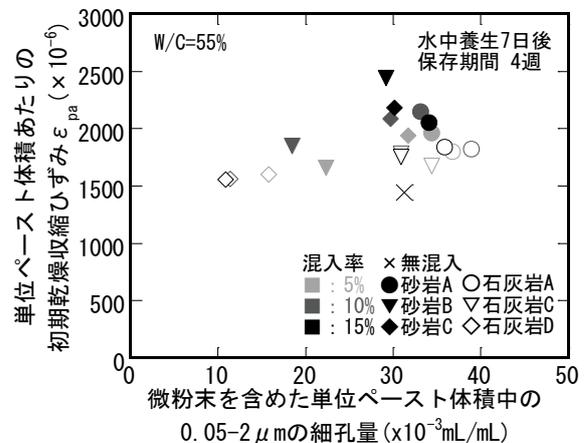


図-14 単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみと細孔量との関係

は見られないが、砂岩系微粉末の場合、単位体積の増加とともに初期収縮ひずみも増加した。0.05~2 μmの細孔量との関係を見ると、初期乾燥収縮ひずみは、石灰岩系微粉末で良好な関係が見られるが、砂岩系微粉末では明確な関係はなかった。

微粉末の粒径は小さいことから、ペースト量や細孔構造に影響を及ぼす可能性がある。そこで、ペースト体積に微粉末の体積を加えて、微粉末も考慮した単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみ ϵ_{pfa} を算出した。

$$\epsilon_{pfa} = \frac{1000 \epsilon_s}{V_w + V_c + V_a + V_f} \quad (2)$$

ここに、 ϵ_{pfa} : 微粉末も考慮した単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 ϵ_s : 初期乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 V_w : モルタル 1m^3 中の水の体積(L)、 V_c : モルタル 1m^3 中のセメントの体積(L)、 V_a : モルタル 1m^3 中の空気の体積(L)、 V_f : モルタル 1m^3 中の微粉末の体積(L)である。

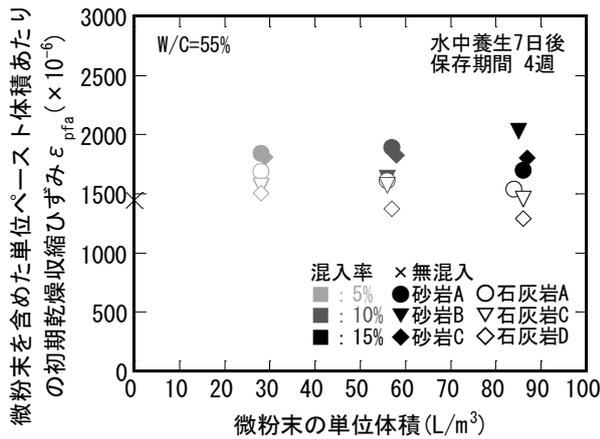


図-15 微粉末を含む単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみと微粉末の単位体積との関係

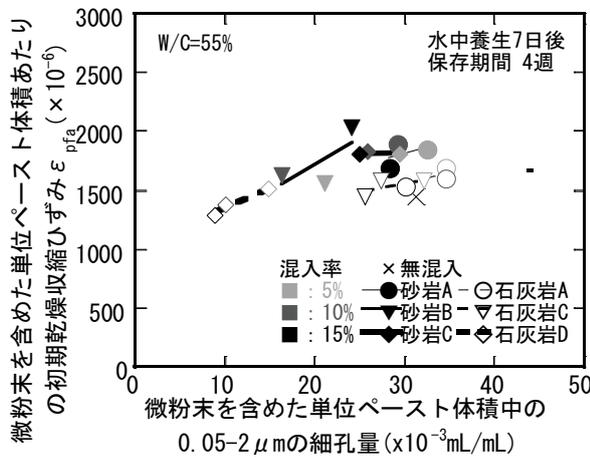


図-16 微粉末を含む単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみと細孔量との関係

微粉末も考慮したペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみと微粉末の単位体積との関係を図-15に、また微粉末を含めた単位ペースト体積中の0.05-2 μ mの細孔量との関係を図-16に示す。ここで、微粉末を含めた単位ペースト体積中の細孔量とは、モルタルに占める配(調)合上のペーストや微粉末の体積および測定した空气体積から算出した、微粉末の体積を含めたペーストの単位体積あたりの細孔量である。

微粉末も含めた単位ペースト体積あたりの初期乾燥収縮ひずみは、砂岩系微粉末の場合、微粉末の単位体積に関係なく一定となった。一方で、石灰岩系微粉末では、単位体積の増加により若干の初期乾燥収縮ひずみの低下が見られた。微粉末も含めた単位ペースト体積あたりの0.05-2 μ mの細孔量との関係を見ると、全体的に初期乾燥収縮ひずみとの関係が見られた。さらに、個々の微粉末ごとの両者の関係で、微粉末によらず、その傾きが同程度と見られる。すなわち、モルタル部分の初期乾燥収縮ひずみを考える上で、微粉末の体積を考慮してペースト

体積を考慮することが重要であるとわかった。岩種ごとの関係が異なることから、今後、粒径や粒子表面の性状の影響を調べる必要があると考えられる。

以上のモルタルに及ぼす骨材の微粒分の影響に関する実験的検討から、モルタルフローには、置換率の他に、微粒分の表面の粗さが影響すること、曲げ強度、圧縮強度には、空気量の減少やペースト量の増加の影響が大きいこと、そして乾燥収縮ひずみには、微粒分の体積を加えた見かけ上のペースト体積を考慮することが必要であることがわかった。

なお、現状の検討では、硬化後のモルタル性状に対する微粉末の物理的性質の影響は明確でなかった。これは微粉末体積の考慮など、配(調)合要因の影響も大きかったためと考えられる。今後は、異なる品質の微粉末やW/Cの実験も行い、配(調)合要因とともに多変量解析などを用いて、硬化後のモルタル性状に影響の大きい、配(調)合要因や微粉末の物理的性質を検討する必要がある。

4. まとめ

以上の微粉末がモルタルのフレッシュ性状および硬化後の性状に及ぼす影響について調べた結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) モルタルの性質に影響を与える砕砂の微粉末の主な物性として、粒子表面の粗さが挙げられ、粗さ表面積比で評価出来る可能性がある。
- 2) モルタルフローに、微粉末の増加によるペースト量の増加と粒子表面の粗さが影響する。
- 3) 微粉末の混入によるモルタルの細孔構造の変化は小さく、曲げ強度、圧縮強度には、空気量の減少やペースト量の増加の影響が大きいことが考えられる。
- 4) 初期乾燥収縮ひずみの変化は、粒子表面の粗さ、微粉末の混入によるペーストの細孔構造やペースト体積の増加が影響すると考えられ、初期乾燥収縮に関わるペーストに微粒分を含めて考える必要がある。

謝辞

本研究は、日本コンクリート工学会近畿支部「性能評価型コンクリートに向けた骨材調査研究委員会」で行われた研究の一部であり、関係各位のご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) 兵頭彦次他：骨材のヤング係数・乾燥収縮に基づくコンクリートの乾燥収縮評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 33, No.1, pp. 479-484, 2011.
- 2) 高見新一他：細骨材の物性および微粒分がモルタルの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響、資源・素材 2010(秋季大会)、企画発表・一般発表(A)講演資料、pp.233-234, 2010