

論文 骨材微粒分の表面積がモルタルの流動性および乾燥収縮に及ぼす影響

上野 敦^{*1}・広川隆史^{*2}・中嶋香織^{*3}・宇治公隆^{*4}

要旨：骨材製造時に副産される微粒分の有効利用の観点から、コンクリートの流動性と乾燥収縮性状に影響を及ぼす微粒分の粒子特性の明確化を目的として、岩種の異なる微粒分を用いて、モルタルを対象とした基礎検討を行った。この結果、骨材微粒分の流動性の指標として土質分野で用いられる液性限界が有効な指標であり、液性限界が BET 比表面積による影響を受けること、液性限界および BET 比表面積とモルタルの 15 打フローおよび乾燥収縮量の相関が高いことを明らかにしている。

キーワード：骨材微粒分、流動性、乾燥収縮、液性限界、比表面積

1. はじめに

細骨材中に含まれる微粒分量が一定量を超えると、コンクリートとしたときの単位水量が増大し、乾燥収縮ひび割れを生じやすくなる。また、微粒分が粘土やシルトなどの場合は、コンクリートの硬化性状や硬化コンクリートの耐久性にも悪影響を及ぼす¹⁾。このため、JIS A 5308 の附属書 1 では、コンクリート表面がすり減り作用を受ける場合として、粘土やシルトなどの混入の可能性の高い天然砂について 3.0% の上限値が規定され、砕砂およびスラグ細骨材について 5.0% の上限値が規定されている。このことは、砕砂やスラグ細骨材の微粒分が基本的に岩石粉やスラグの微粉であることによるものであると考えられる。しかし、石灰石の場合が典型²⁾のように、砕石微粉であってもコンクリートの流動性などへの影響は、その種類によって変化すると考えられる。

本研究は、コンクリートの流動性および乾燥収縮性状に影響を及ぼす骨材微粒分の特性の明確化を目的とし、モルタルを対象とした基礎検討を行ったものである。本研究においては、岩種の異なる骨材微粒分の比表面積および水中での堆積厚さに着目し、これらの指標とモルタルの流動性の関係を検討し³⁾、さらに、圧縮強度および乾燥収縮性状との関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、密度 3.16g/cm³ の普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、表乾密度 2.63g/cm³、吸水率 1.01% の砂岩砕砂を用い、含有する 0.075mm 以下の微粒分を取り除いたものを使用した。骨材微粒分による影響を明確にするため、化学混和剤は用いないこととした。

骨材微粒分には、実際の骨材製造工場で副産されるダ

表-1 使用微粒分の密度と比表面積

岩種	密度 (g/cm ³)	BET比表面積 (m ² /g)
砂岩	2.63	8.29
輝緑凝灰岩	2.89	3.37
安山岩	2.54	2.43
石灰石	2.73	1.41
再生	2.29	16.7

ストを使用し、0.075mm 以下の粒径となるよう、必要に応じて粗粒分を除去した。試験に用いた微粒分の岩種は、表-1 に示すとおり、砂岩、安山岩、輝緑凝灰岩および石灰石とした。なお、砕石微粉末とは著しく異なる粒子特性を持つと考えられる再生骨材微粉についても試験を行った。各骨材微粒分は、105℃の乾燥機で恒量となるまで乾燥させた後、20℃、60%RH の恒温恒湿室内に保管し、気乾状態で使用した。なお、その他の使用材料および器具類も同じ温湿度条件で保管して試験に使用した。

2.2 モルタルの配合

モルタルの配合は、通常のコンクリート中でのモルタルの組成を考慮し、ペーストと細骨材の絶対容積の割合 (V_p/V_s) を 1.00 とし、W/C を 0.50 とした。各岩種の微粒分は、細骨材絶対容積を容積置換する形で使用し、モルタルの流動性の検討では、置換率を、0、5、10、15 および 20% とし、強度の検討では置換率を 0、10 および 20% とした。また、乾燥収縮性状の検討では、微粒分の置換率を 0、15 および 30% とした。モルタルの配合を容積配合で表すと、表-2 に示すとおりとなる。

2.3 実験項目

(1) 微粒分のキャラクタリゼーション

天然岩石由来の微粒分と再生骨材微粒分、また、成立要因の異なる各種の岩石微粒分は、その石質（構成鉱物

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻 准教授 工博 (正会員)

*2 新潟市役所 東部地域下水道事務所

*3 東京都立大学 工学部土木工学科

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-2 モルタルの容積配合

W/C	Vp/Vs	微粒分 置換率(%)	単位容積 (L/L)			
			W	C	S	微粒分
0.50	1.00	0	0.306	0.194	0.500	0
		5	0.306	0.194	0.475	0.025
		10	0.306	0.194	0.45	0.05
		15	0.306	0.194	0.425	0.075
		20	0.306	0.194	0.4	0.1
		30	0.306	0.194	0.35	0.15

など)としては異なるものであるが、本研究では、基礎検討としての位置づけから、以下に述べるとおり、微粒分の粒子が持つ基本的な特性に着目することとした。

JIS A 1205 に準拠した微粒分の液性限界試験を行い、この結果を微粒分自体の流動性の指標とした。液性限界試験では、液性限界の含水比が得られる。すなわち、鉛直振動下で一定の流動性(落下回数25回で所定の流動性)を示すために必要な含水比を得ることができる。したがって、液性限界が小さいものほど、流動に必要な水量が少ないことを意味する。

微粒分の流動性、すなわち、液性限界には、水中での粒子表面の帯電の程度と、水を拘束する粒子表面積の影響が大きいのと考え、窒素吸着法による比表面積の測定を行った。そして、水中での粒子表面の帯電の程度を示す指標として、JIS A 1801 のプラスチックシリンダを用い、水中での堆積厚さの測定を行った。堆積厚さの試験では、媒体を水とし、シリンダの標線まで水を満たした後、絶対容積が25mlの各微粒分を入れ、激しく攪拌した後沈降終了まで静置し、堆積厚さを測定した。水中での堆積厚さが大きいものほど、水中での粒子帯電が強く、粒子に作用する斥力が大きいものと考えられる。

(2) モルタル品質への影響の検討

モルタルの流動性は、JIS R 5201 に規定の15打フロー試験によって評価した。

モルタルの圧縮強度は、JSCE-G 505 に従い、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体で試験した。供試体の養生は20℃水中養生とし、材齢28日で試験を実施した。

モルタルの乾燥収縮試験は、JIS A 1129-2 に従い、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の供試体を用いて実施した。試験においては、水中養生材齢7日で基長を設定し、その後、20℃、60%RHの恒温恒湿室内に保管し、供試体の質量および長さを測定した。

3. 結果および考察

3.1 微粒分の特性

(1) 液性限界

液性限界試験で得られた流動曲線を図-1に示す。また、図-1から得られる、落下回数25回の含水比に相当する、

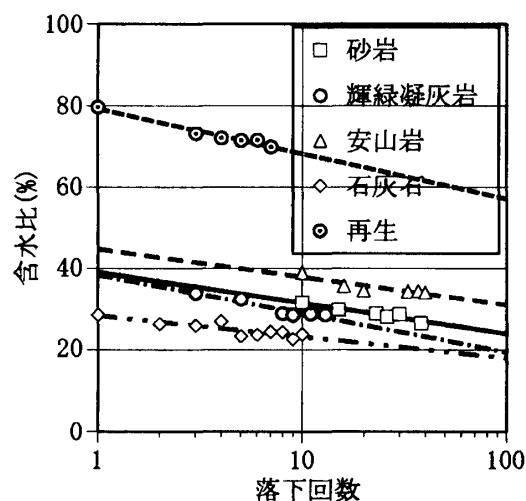


図-1 微粒分の流動曲線

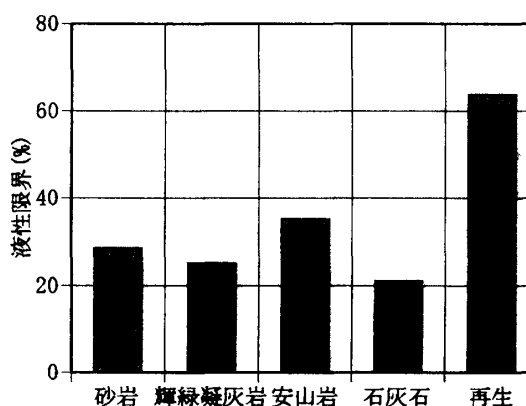


図-2 微粒分の液性限界

各微粒分の液性限界を図-2に示す。液性限界の差はそれほど明確ではないが、天然岩石由来の微粒分を比較すると、安山岩が比較的大きな液性限界(約35%)を示し、砂岩、輝緑凝灰岩および石灰石では20～30%弱の値を示すことがわかる。詳細は明らかではないが、火山岩である安山岩で若干大きな液性限界となること、堆積岩で液性限界が小さくなり、粒子組織が最も均質に近く、粒子表面のテクスチャが平滑に近いと予測される石灰石で液性限界が最小となっていることから、微粒分の液性限界は、粒子の組織構造や表面の性状を概ね表しているものと考えられる。一方、再生骨材微粒分は、天然岩石由来の微粒分と比較して、液性限界が顕著に大きく、流動

に多くの水を必要とすることがわかる。再生骨材微粒分は、基本的に硬化セメントペーストの粒子と考えると、粒子内部に多量の空隙を有すると考えられるため、このことから、微粒分の液性限界は、粒子の組織構造やテクスチャに影響を受けるものと推察される。

(2) 水中での堆積厚さ

各微粒分の水中での堆積厚さは、図-3に示すとおりである。天然岩石由来の微粒分については、岩種に関わらずほぼ同等の堆積厚さとなる。そして、再生骨材微粒分の堆積厚さは、他のものと比較して大きくなった。水中での堆積厚さは、粒子表面の帯電による斥力の影響を受けると考えると、再生骨材微粒分は表面電荷が比較的大きいものと推察できる。表面電荷による斥力が大きいと、図-2に示した液性限界が小さくなるものと考えられるが、本実験の結果は逆の傾向を示した。このことは、結果として得られる堆積厚さに、粒子の密度、形状、粒度の影響も含まれるためと考えられる。

(3) BET 比表面積

各微粒分の BET 比表面積は、表-1および図-4に示すとおりである。天然岩石由来の微粒分で比較すると、石灰石が顕著に小さな比表面積となり、砂岩の比表面積が比較的大きいことがわかる。また、再生骨材微粒分の比表面積は他のものと比較して著しく大きく、粒子内部に多くの細孔を有しているものと推察される。

(4) 微粒分のキャラクターのまとめ

ここまで検討してきた微粒分の特徴をまとめると、図-5のような関係が示される。厳密に言えば、石質が異なる微粒分を一律に評価することについては問題があるかもしれないが、実験結果に若干ばらつきがあるものの、BET 比表面積と液性限界の関係は直線的であり、その感度も良好となる傾向にある。このことは、(1)でも述べたとおり、液性限界および BET 比表面積が、微粒分粒子の組織構造や表面性状に影響されているためと考えられる。一方、堆積厚さと液性限界の関係は、堆積厚さが大きいと液性限界が大きくなる傾向を示すが、堆積厚さの分解能が小さいこともあり、BET 比表面積の場合と比較して、敏感な指標とは言えない結果となっている。

3.2 モルタルの流動性

(1) 微粒分置換率と 15 打フロー

微粒分の置換率とモルタルの 15 打フローの関係は、図-6に示すとおりとなった。一般には、微粒分置換率の増加にともない、モルタルの 15 打フローが減少する結果となっている。微視的には、置換率 5% の場合、15 打フローは置換率 0% と比較して、同等もしくは増大することがわかる。これらのことは、モルタル中の微細粒子の含有量が変わることによる、流動性の向上効果と粘性の増大効果⁴⁾を表しているものと考えられる。

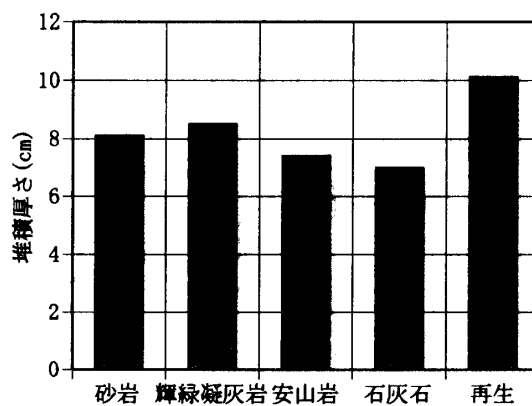


図-3 水中での堆積厚さ

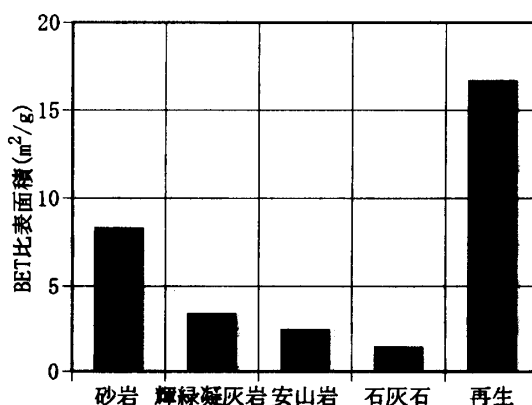


図-4 微粒分の BET 比表面積

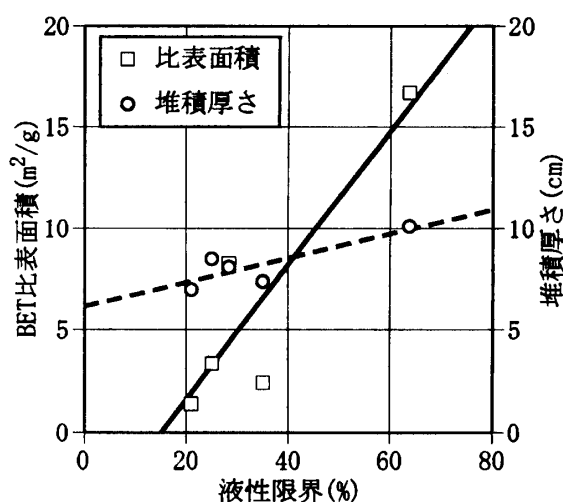


図-5 微粒分の特性値の相互関係

(2) 液性限界と 15 打フロー

微粒分の液性限界とモルタルの 15 打フローの関係を、置換率 10 および 20% の場合を例に図-7に示す。図-7からは、置換率に関わらず、微粒分の液性限界の増大にともない、モルタルの 15 打フローが直線的に減少することがわかる。このことは、微粒分を用いたモルタルの流動性が、微粒分自体の流動性に顕著に影響されることを示していると考えられる。

(3) 堆積厚さと 15 打フロー

微粒分の水中での堆積厚さとモルタルの 15 打フロー

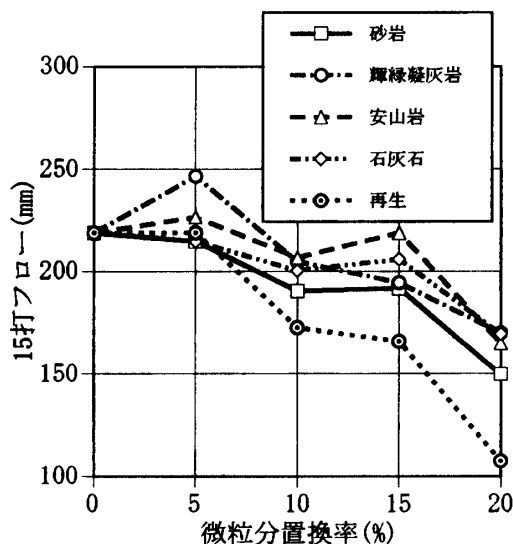


図-6 微粒分置換率と15打フロー

の関係を、置換率10および20%の場合を例に図-8に示す。それほど顕著とは言えないが、置換率に関わらず、微粒分の堆積厚さの増大によって、15打フローが直線的に減少する傾向となることがわかる。堆積厚さが微粒分の表面電荷の指標となる場合は、表面電荷が大きいと、すなわち、堆積厚さが大きいと、モルタルの流動性は向上する可能性があるが、本研究の結果は、明確ではないものの、その逆の傾向を示した。このことは、微粒分の表面電荷の極性とセメント粒子の極性との関係や、前述のとおり、堆積厚さに、微粒分の物理的・幾何学的性質が含まれることによるものと推察される。堆積厚さは、結果的に、微粒分の拘束水量を示す可能性もあると考えられ、今後、粉体の拘束水比⁵⁾との関連を検討するのが良いと思われる。

(4) BET 比表面積と15打フロー

微粒分の BET 比表面積とモルタルの15打フローの関係を、置換率10および20%の場合を例に図-9に示す。置換率に関わらず、微粒分の比表面積が大きくなると、モルタルの15打フローは直線的に減少することがわかる。そして、この傾向は、置換率が大きいと顕著になる。このことは、微粒分の表面積の増大にともない、粒子表面に拘束される水量が増加するためと考えられる。図-9の結果と、図-7の結果は非常に類似の傾向を示している。このことから、液性限界に対して、比表面積の影響が大きいことがわかる。

3.3 硬化モルタルの特性

(1) 圧縮強度

微粒分の置換率とモルタルの材齢28日における圧縮強度の関係は図-10のとおりとなる。微粒分の種類に関わらず、置換率10%の場合、圧縮強度は微粒分を用いないものと比較して同等以上となった。置換率が20%の場合、再生骨材微粒分を用いたモルタルの圧縮強度は顕著

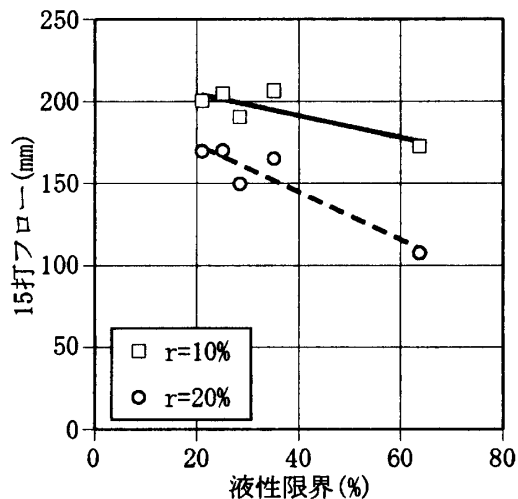


図-7 微粒分の液性限界と15打フロー

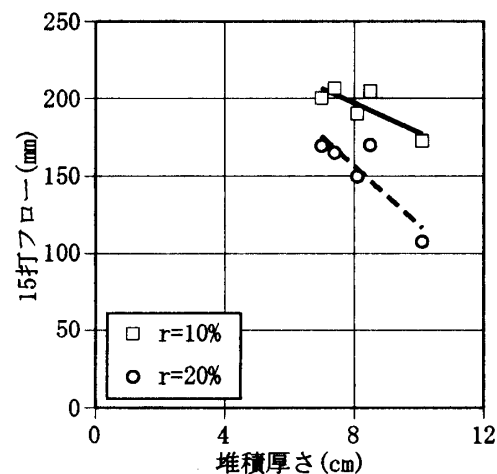


図-8 堆積厚さと15打フロー

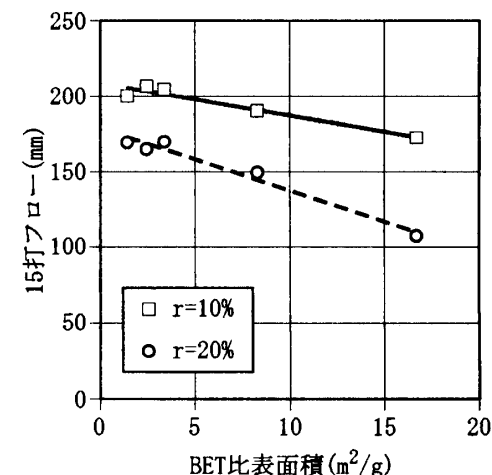


図-9 BET 比表面積と15打フロー

に低下することがわかる。そして、天然岩石由来の微粒分を用いたモルタルの圧縮強度は、置換率が20%であっても、置換率0%のものと比較して、同等以上になることがわかる。これらの結果には、微粒分による強度増進の効果⁶⁾や、微粒分自体の若干の反応性なども影響して

いるものと推察される。

(2) 乾燥収縮

各モルタルの乾燥収縮環境における長さ変化率の経時変化を置換率ごとに整理すると、図-11 および 12 に示すとおりとなる。置換率 15% の場合、石灰石以外の天然岩石由来の微粒分を用いたものの収縮性状は、微粒分を用いない場合と同等となり、石灰石微粒分を用いた場合、収縮が小さくなる傾向がわかる。そして、再生骨材微粒分を用いた場合は、収縮量が大きくなることわかる。置換率が 30% となると、石灰石以外の天然岩石由来の微粒分を用いた配合の収縮量が再生骨材微粒分を用いたものと同程度にまで増加することがわかる。

各モルタルの質量の経時変化については、再生骨材微粒分を用いた場合の質量変化率が他のものと比較して若干小さい傾向を示した。また、微粒分の置換率は、モルタルの質量変化に対して顕著な影響を及ぼさない結果となった。

微粒分を含むモルタルの組織構造について考察するため、質量変化率と長さ変化率の関係を整理すると、図-13 のとおりとなる。図-13 以降では、理解のため、軸の表示を逆方向としている。置換率 15% においては、天然岩石由来の微粒分を用いた場合、岩種による影響はそれほど顕著とならないが、同等の質量変化率における再生骨材微粒分を用いたモルタルの収縮量が他と比較して大きくなっており、モルタル中に多くの細孔を有していることが推察できる。また、置換率が 30% となると、両者の関係には、岩種による影響が顕著となるようである。

微粒分の BET 比表面積と乾燥 56 日目における収縮率の関係を整理すると図-14 のとおりとなる。モルタル中の微粒分の含有量によっても影響を受けるが、一般には、BET 比表面積の大きな微粒分を用いると、硬化体の収縮が大きくなることわかる。これは、骨材内部表面積がコンクリートの収縮と相関が高いという既往の知見⁷⁾と類似した表面エネルギー的な影響とも考えられるが、単純に、硬化体中の細孔が増加することの影響も大きいと思われる。図-5 で示したとおり、微粒分の BET 比表面積と液性限界は比較的良好な相関を示すため、図-15 のとおり、乾燥 56 日目における収縮率と液性限界との間にも、BET 比表面積の場合と同様の相関を見いだすことができる。すなわち、微粒分量による影響もあるが、骨材微粒分の特性として、液性限界または BET 比表面積を得ることによって、硬化体の収縮率を概ね把握できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

骨材製造時に発生する微粒分の有効利用の観点から、コンクリートの流動性および乾燥収縮性状に影響を及ぼ

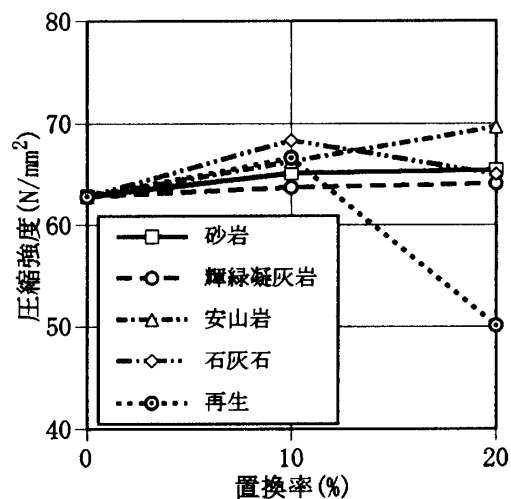


図-10 微粒分置換率と圧縮強度

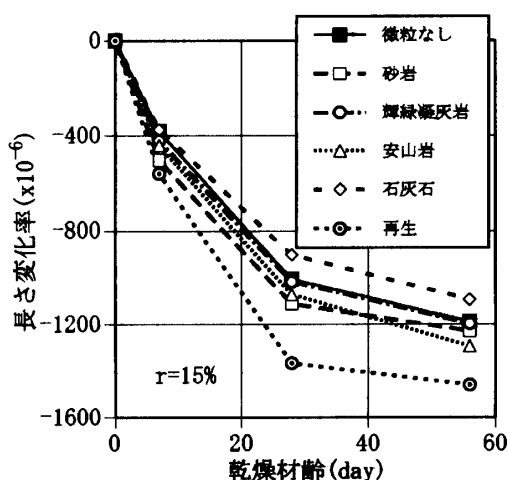


図-11 モルタルの長さ変化（置換率 15%）

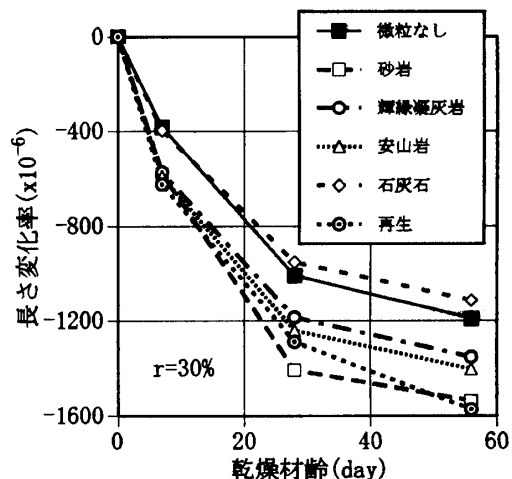


図-12 モルタルの長さ変化（置換率 30%）

す微粒分の特性の明確化を目的として、モルタルを対象とした基礎的な検討を行った。本研究では、岩種の異なる微粒分の液性限界、比表面積および水中での堆積厚さを試験し、これら指標の相互の関係性、モルタルの流動性と各特性値との関係性について検討した。また、微粒分の特性や使用量と、モルタルの圧縮強度および乾燥収縮性状の関係について検討した。

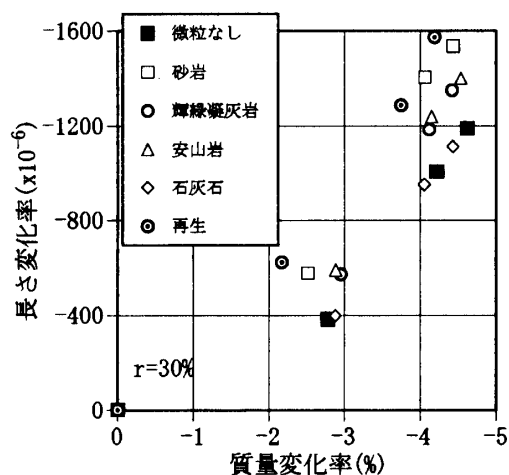
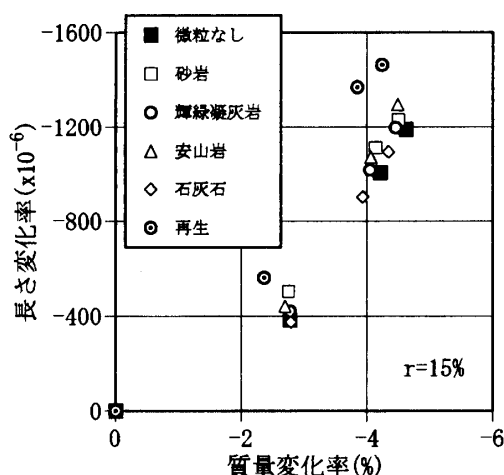


図-13 質量変化率と長さ変化率の関係

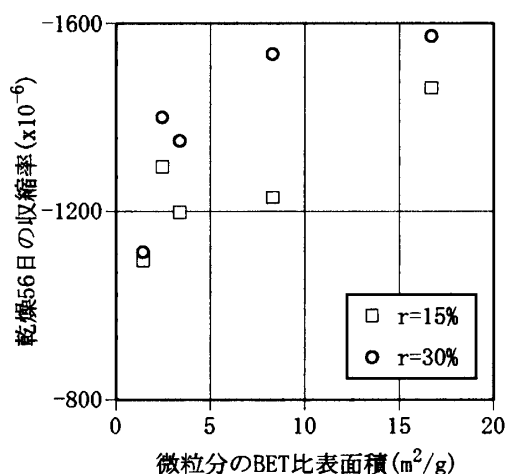


図-14 微粒分の BET 比表面積と最大収縮率

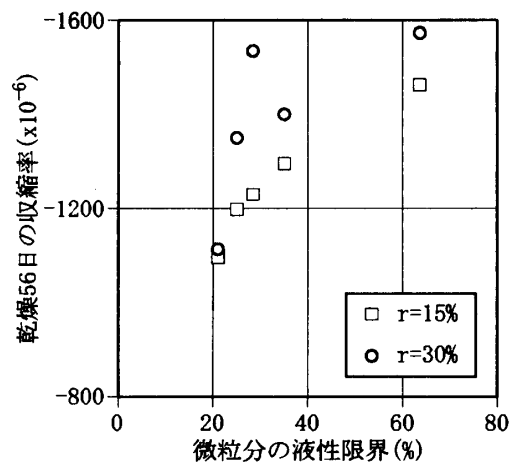


図-15 微粒分の液性限界と最大収縮率

本研究の範囲内で、以下のことが明らかになった。

- (1) 骨材微粒分の液性限界と BET 比表面積には、直線的な相関がある。
- (2) 骨材微粒分の液性限界の増大にともない、モルタルの 15 打フローは直線的に減少する。
- (3) 微粒分の BET 比表面積が増加すると、モルタルの流動性は直線的に低下する。この傾向は、微粒分置換率が高い方が顕著となる。
- (4) 天然岩石由来の微粒分を用いた場合、置換率 20% の範囲では、モルタルの圧縮強度に悪影響を及ぼさない。
- (5) 微粒分置換率 15% の場合、石灰石以外の天然岩石由来の微粒分を用いモルタルの乾燥収縮性状は、微粒分を用いない場合と同等となり、置換率が 30% となると、収縮率が増大し、再生骨材微粒分を用いたモルタルと同程度となる。石灰石微粒分を用いた場合は、置換率に関わらず収縮率が小さくなる傾向にある。
- (6) 微粒分の BET 比表面積や液性限界が増加すると、モルタルの乾燥収縮率の最大値は大きくなる傾向を示す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧，第

二版，技報堂出版，pp. 58-59，1996. 2

- 2) 鶴田昌宏，小島明，中村秀三：細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 99-104，2004. 7
- 3) 広川隆史，上野敦，國府勝郎，宇治公隆：骨材微粒分の表面積および表面電荷がモルタルの流動性に及ぼす影響，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，第 V 部，pp. 1095-1096，2007. 9
- 4) 上野敦，國府勝郎，宇治公隆：スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質向上に関する研究，土木学会論文集 E，Vol. 62，No. 2，pp. 462-476，2006. 6
- 5) 枝松良展，下川浩児，岡村 甫：粉体の特性とペーストのフロー値との関係，土木学会論文集，No. 544/V-32，pp. 65-75，1996. 8
- 6) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究，土木学会論文集，第 85 号，pp. 15-46，1962. 9
- 7) 後藤幸正，藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響，土木学会論文報告集，第 286 号，pp. 125-137，1979. 6