

論文 石灰岩砕砂の微粒分量がモルタルの乾燥収縮に及ぼす影響

河野 克哉^{*1}・黒澤 真一^{*2}・高木 亮一^{*3}・吉本 稔^{*4}

要旨：本研究は、石灰岩骨材の微粒分量がモルタルの乾燥収縮に与える影響を把握することを目的としている。そのために微粒分量が異なる石灰岩砕砂を用いたモルタルの乾燥収縮を安山岩砕砂の場合と比較する形で検討した。その結果、石灰岩砕砂を用いた場合には微粒分量が少ないほど乾燥収縮が小さくなること、微粒分量が同程度の場合には安山岩砕砂よりも石灰岩砕砂を用いた方が乾燥収縮は小さくなることがわかった。また、石灰岩砕砂を用いたモルタルでは微粒分量が増加するほど硬化組織の空隙量が低減して緻密になるため、微粒分量が乾燥収縮ひずみと逸散水量の関係に影響を及ぼすことが明らかになった。

キーワード：石灰岩, 安山岩, 砕砂, 微粒分量, 乾燥収縮, 空隙径分布

1. はじめに

石灰岩は炭酸カルシウムを主成分とした堆積岩であり、セメント製造のほかにも製鉄などの分野で工業材料として広く利用されている。近年では、セメント用の原料以外にもコンクリート用の骨材としての用途にも利用されるようになり、コンクリート用骨材に占める石灰岩骨材の割合は増加しているのが実情である¹⁾。このような背景には、川砂利・川砂などの良質な天然骨材資源が枯渇している現状に加え、シリカ分を含まない石灰岩は骨材に使用したときにアルカリシリカ反応に対する懸念が少ないことや、石灰岩砕石を用いたコンクリートでは乾燥収縮が小さくなること²⁾など、コンクリートの耐久性を向上できることも関与していると考えられる。

しかしながら、石灰岩を骨材として利用する場合、コンクリート製造場所までの搬送中に摩擦して粉状化を起しやすく、砕石・砕砂中の微粒分量が増加するといった課題がある。この微粒分の増加は、フレッシュコンクリートの単位水量の低減による材料分離の抑制やコンクリートの初期強度発現性の改善などに寄与できるため、多くの場合には実用上の利点となることが明らかにされているものの³⁾、微粒分が乾燥収縮に与える影響については明確になっていない。なお、細骨材の一部を混和材である石灰石微粉末で置換したコンクリートでは乾燥収縮が低減するという既往の報告がある⁴⁾。

本研究では、石灰岩を骨材とした場合の微粒分がセメント硬化体の乾燥収縮に与える影響を把握することを目的とした。そのために微粒分量が異なる石灰岩砕砂(細骨材)を用いたモルタル供試体を作製し、その乾燥収縮特性を同じように微粒分量を変化させた安山岩砕砂の場合と比較する形で検討し、収縮機構を考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに配合

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。結合材として普通ポルトランドセメントを用い、混和剤には高性能 AE 減水剤ならびに消泡剤を、細骨材には石灰岩ならびに安山岩の砕砂を使用した。それぞれの岩石における化学分析値を表-2 に示す。なお、砕砂の微粒分量は、網ふるい 0.075mm の上での水洗い、もしくは超音波洗浄にて微粒分を除去することで、石灰岩の場合は 9.82%、3.80%および 0.10% の 3 水準、安山岩の場合は 3.78%ならびに 0.58%の 2 水準に調整した。また、図-1 ならびに図-2 は本実験で使用した石灰岩砕砂ならびに安山岩砕砂の粒度曲線をそれぞれ示したものであり、いずれも JIS A 5005 に規定された粒度範囲を満たすものとなっている。

(2) 配合

モルタルの配合は、表-2 に示すように粗骨材の絶対容積を 350ℓ/m³と仮定し、単位水量が 170kg/m³で水セメント比は 50%で一定となるようなコンクリートのモルタル部分とした。すなわち、コンクリート配合における細骨材率(s/a)が 51.6%で一定になるように岩種ならびに微粒分量が異なる 5 種類の砕砂を加え、モルタルのフロー(無振動 0 打)が 180±10mm の範囲となるように高性能 AE 減水剤の添加量で調整した。なお、セメント質量に対して 0.02%のポリエーテル系の消泡剤(エントレインドエアの抑泡作用をもつ混和剤)を各配合に一律で添加し、空気量が 2.0%以下となるように調整した。

2.2 乾燥収縮試験の方法

(1) 養生方法

ミキサにて練り上がったモルタルは、30 分ごとにアジ

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発 1 部 セメント化学チーム 主任研究員 修(工) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発 1 部 セメント化学チーム 研究員 修(工) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 建設・資源材料チーム 研究員 修(工) (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 建設・資源材料チーム リーダー 修(工) (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性または成分
結合材	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3330cm ² /g
細骨材 (S)	石灰岩砕砂	L10	微粒分量 9.82%, 表乾密度 2.66kg/ℓ, 吸水率 0.82%, 粗粒率 3.14
		L03	微粒分量 3.80%, 表乾密度 2.69kg/ℓ, 吸水率 0.88%, 粗粒率 3.12
		L00	微粒分量 0.10%, 表乾密度 2.67kg/ℓ, 吸水率 0.77%, 粗粒率 3.18
	安山岩砕砂	A03	微粒分量 3.78%, 表乾密度 2.60kg/ℓ, 吸水率 2.34%, 粗粒率 2.61
		A00	微粒分量 0.58%, 表乾密度 2.62kg/ℓ, 吸水率 2.05%, 粗粒率 2.65
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系エーテル系
	消泡剤	T	ポリアルキレングリコール誘導体

表-3 モルタルの配合

No.	配合条件										モルタルの フロー値 [無振動 0 打] (mm)		
	W/C (%)	s/a [仮定] (%)	Air (%)	単位量					SP (C×%)	T (C×%)			
				W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)						G[仮定] (ℓ/m ³)	
L10	L03	L00	A03	A00									
1						991	—	—	—	—	0.7	0.02	190
2						—	1002	—	—	—	0.7		188
3	50	[51.6]	0.0	170	340	—	—	994	—	—	0.6		174
4						—	—	—	968	—	1.3		170
5						—	—	—	—	976	1.6		171

* 粗骨材(G)の絶対容積を 350ℓ/m³と仮定したコンクリートのモルタル部分となる 650ℓ当りの量として表示。

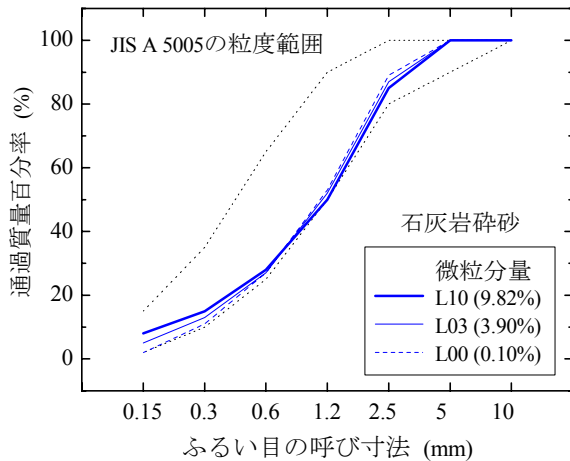


図-1 微粒量が異なる3種類の石灰岩砕砂の粒度曲線

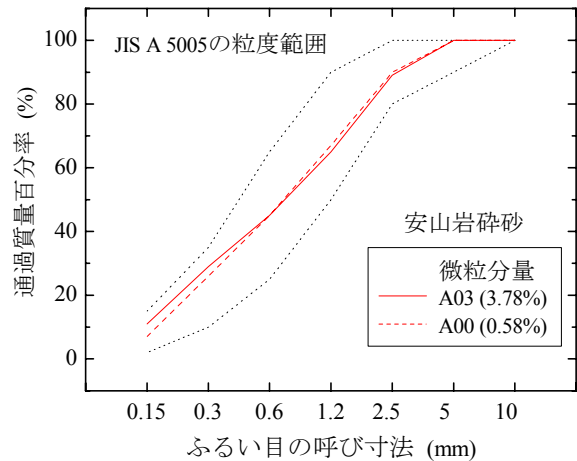


図-2 微粒量が異なる2種類の安山岩砕砂の粒度曲線

テートを繰り返し、水和の進行とともにブリーディングの発生が落ち着くまでの時間(約6時間)を確保して型枠(寸法4×4×16cm)に打ち込んだ。この供試体は、材齢1日で脱型した後、水中養生(20℃)の期間を材齢1日、3日、7日および14日に変化させて乾燥収縮を測定した。

(2) 長さ変化ならびに質量変化の測定

所定の材齢まで水中養生した供試体は、あらかじめ軸方向の両端面に埋め込んだコンタクトチップを用い、傾斜式デジタルマイクロメータにて長さ変化を測定した。いずれの供試体も水中養生終了直後の長さ[基長: L_0 、基準棒の長さとの差: ΔL_0]ならびに質量[w_0]を測定して基準とし、その後すぐに気温 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室に保管した。所定の乾燥期間[i]を経過した時点で供試体の長さ[基準棒の長さとの差: ΔL_i]ならびに質量[w_i]

表-2 使用した骨材の化学分析値(%) [蛍光X線分析]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ig.loss
石灰岩	0.29	0.17	56.20	0.58	0.00	0.00	0.11	42.50
安山岩	55.10	17.90	8.92	1.93	0.72	2.50	8.15	3.61

を測定し、乾燥収縮ひずみ[$\epsilon = (\Delta L_0 - \Delta L_i) / L_0$]ならびに逸散水量[$w = w_0 - w_i$]を算出した。

(3) 空隙径分布の測定

所定の水中養生が終了した乾燥開始前のモルタル供試体の空隙径分布を水銀圧入式ポロシメータにて測定した。試料には、乾燥収縮測定用供試体と同一の配合、同一寸法および同一養生にしたモルタル供試体から中心部を採取し、5mm角程度の大きさに切断加工したものをを用いた。なお、測定に供した試料はアセトンに繰返し浸漬して水和を停止させ、D-乾燥を行った。

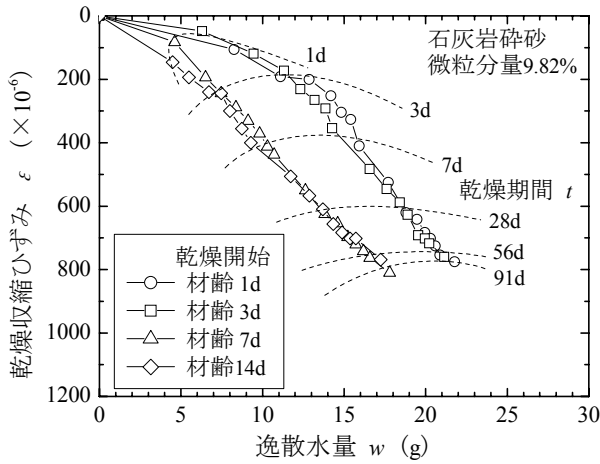


図-3 石灰岩砕砂 L10 を用いたモルタルの $w-\varepsilon$ 曲線

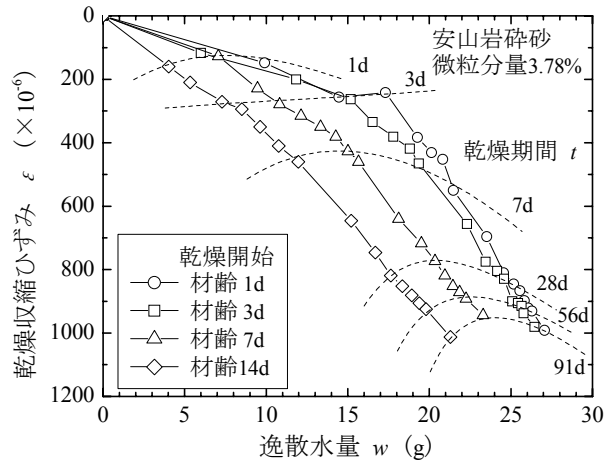


図-6 安山岩砕砂 A03 を用いたモルタルの $w-\varepsilon$ 曲線

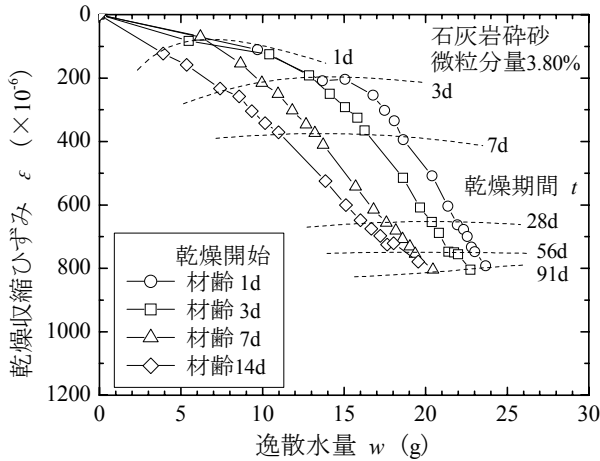


図-4 石灰岩砕砂 L03 を用いたモルタルの $w-\varepsilon$ 曲線

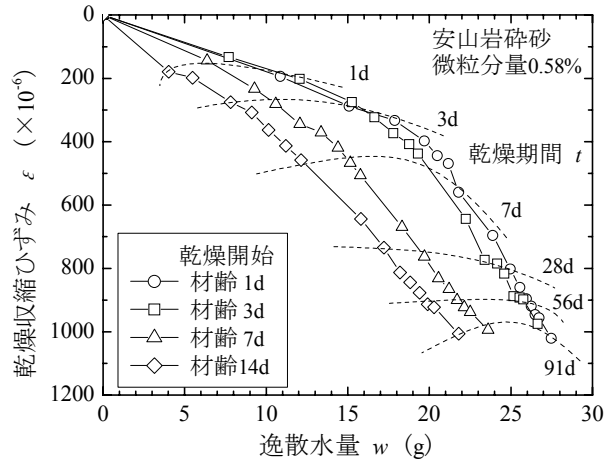


図-7 安山岩砕砂 A00 を用いたモルタルの $w-\varepsilon$ 曲線

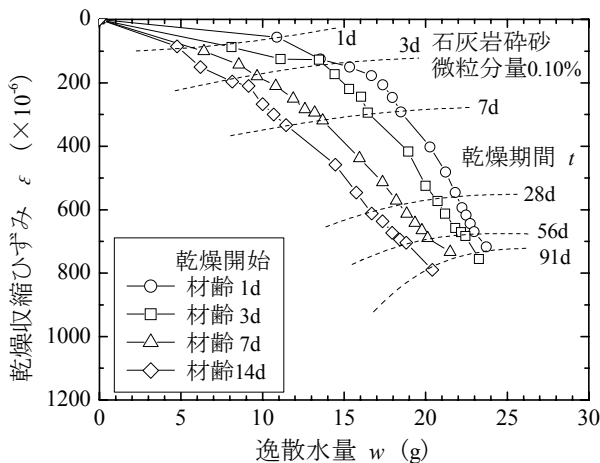


図-5 石灰岩砕砂 L00 を用いたモルタルの $w-\varepsilon$ 曲線

3. 実験結果ならびに考察

3.1 砕砂モルタルの乾燥収縮に与える養生期間の影響

図-3、図-4 および図-5 は微粒分量が異なる石灰岩砕砂を用いたモルタルにおいて乾燥開始までの材齢(水中養生の期間)が逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係(以

下、 $w-\varepsilon$ 曲線)に与える影響を示したものである。いずれの微粒分量の場合においても、 $w-\varepsilon$ 曲線の横軸方向への移動量は水中養生期間に対応させることができ、養生期間が長くなるほど横軸負方向への平行移動量が増加している。 $w-\varepsilon$ 曲線は水中養生期間が短いときには折れ曲がった2つの直線で表現されるような非線形性を示すものの、水中養生期間が長くなると1つの直線で表現されるような線形性を示すようになる。これらのことは、モルタル供試体が乾燥を受けたときには、はじめに収縮を起こさず質量減少のみに寄与するような水から逸散し、次第に収縮を起こすような水が逸散するように移行していくことを示している。モルタル供試体において、前者のような水は比較的粗大な空隙に、後者のような水は比較的微細な空隙に存在していることが推察できる。このため、水中養生期間が短いときには比較的大きな空隙に存在する水が収縮を生じずに質量減少のみに寄与する形で逸散している。そして水中養生期間が長くなると比較的小さい空隙が増加し、そのような微細な空隙に存在する水が失われることで収縮を起こすよ

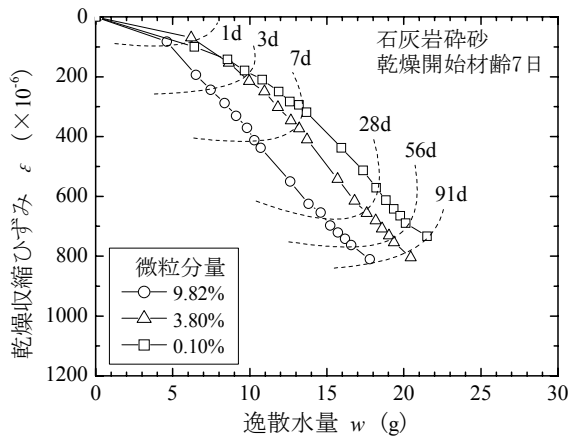


図-8 石灰岩砕砂モルタルの $w-\epsilon$ 曲線(養生材齢 7 日)

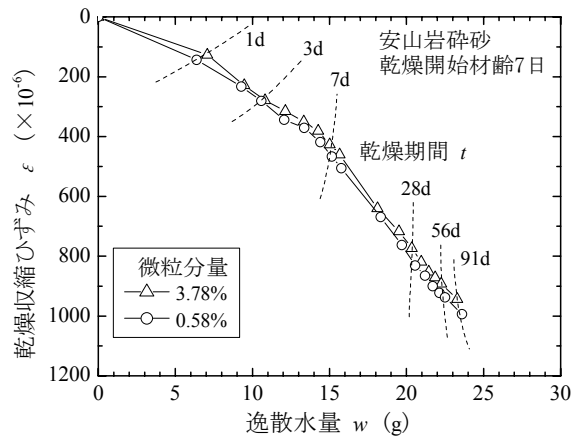


図-10 安山岩砕砂モルタルの $w-\epsilon$ 曲線(養生材齢 7 日)

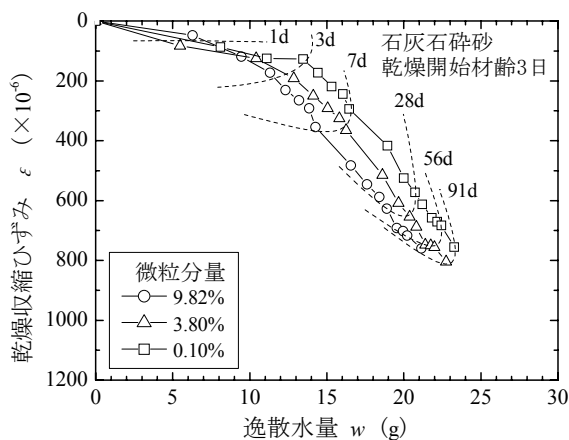


図-9 石灰岩砕砂モルタルの $w-\epsilon$ 曲線(養生材齢 3 日)

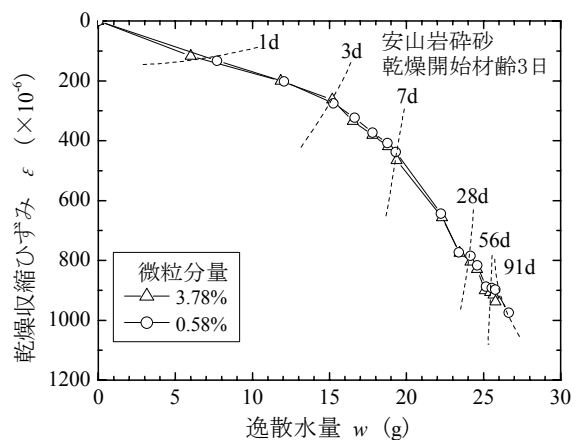


図-11 安山岩砕砂モルタルの $w-\epsilon$ 曲線(養生材齢 3 日)

うになったものと考えられる。なお、微粒分量が 3.80% ならびに 0.10% の場合にはそれぞれ 4 通りの水中養生期間に対応した $w-\epsilon$ 曲線が 4 本ほど存在しているが、微粒分量が 9.82% の場合における $w-\epsilon$ 曲線は水中養生期間が短い場合(材齢 1 日と材齢 3 日)と長い場合(材齢 7 日と材齢 14 日)とで各々が一致し、2 本の曲線が存在するような形になっている。また、乾燥期間 91 日における乾燥収縮ひずみは微粒分量が 9.82% ならびに 3.80% の場合で $780\sim 810 \times 10^{-6}$ 程度、微粒分を除去して 0.10% とした場合で $710\sim 770 \times 10^{-6}$ 程度となっており、石灰岩砕砂の微粒分が少なくなるとモルタルの乾燥収縮は小さくなる傾向が認められる。

図-6 ならびに図-7 は微粒分量が異なる安山岩砕砂を用いたモルタルにおいて乾燥開始までの材齢(水中養生期間)が $w-\epsilon$ 曲線に与える影響を示したものである。安山岩砕砂の場合にも石灰岩砕砂の場合と同じように $w-\epsilon$ 曲線の横軸平行移動量は水中養生期間と対応させることができる。ただし、安山岩砕砂を用いた場合は、石灰岩砕砂を用いた場合と同一の微粒分量で同一の水中養生期間であっても、養生期間の短縮によって生じる $w-\epsilon$ 曲線の横軸正方向への移動量は増加する傾向を示

した。これは、安山岩砕砂を用いた場合には養生期間が短いときセメントペーストに形成される空隙が石灰岩砕砂の場合よりも粗大になっていることが推察でき、その粗大な空隙に存在する水はあまり収縮しないためと考えられる。なお、乾燥期間 91 日における乾燥収縮ひずみは微粒分量が 3.78% の場合で $950\sim 1010 \times 10^{-6}$ 程度と石灰岩砕砂の場合よりも大きくなることがわかった。また、安山岩砕砂の微粒分を除去して 0.58% とした場合には乾燥収縮ひずみが $980\sim 1020 \times 10^{-6}$ 程度となり、同じように微粒分を除去した石灰岩砕砂の場合よりも大きな収縮量を示している。このことから、微粒分を除いた石灰岩砕砂の場合にくらべて乾燥収縮を低減するように作用するものの、石灰岩砕砂中の微粒分は乾燥収縮を増大させるように作用することがわかった。また、同じ微粒分量 3.0% 程度の石灰岩砕砂と安山岩砕砂を比較した場合でも、石灰岩砕砂を用いたモルタルの方が乾燥収縮は小さくなった。これらのことは、一般に石灰岩の弾性係数が安山岩の弾性係数よりも高く⁵⁾、石灰岩砕砂の粗粒分はセメントペーストが収縮する際に変形を拘束するように働く効果が大いことに起因するものと考えられる。

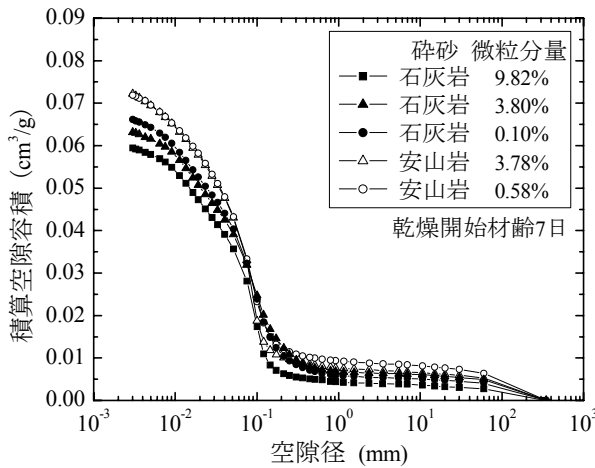


図-12 砕砂モルタルの空隙径分布 (養生材齢 7 日)

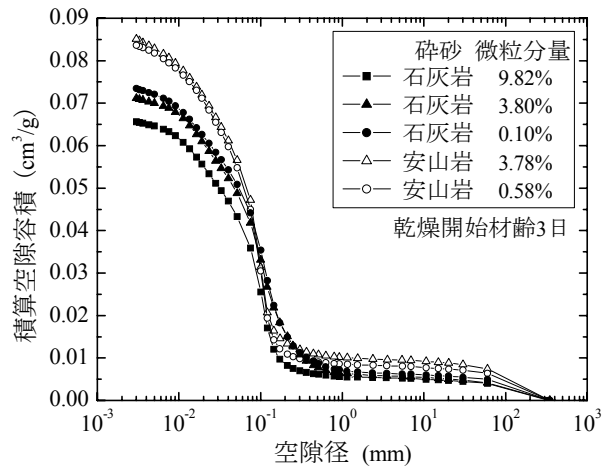


図-13 砕砂モルタルの空隙径分布 (養生材齢 3 日)

3.2 砕砂モルタルの乾燥収縮に与える微粒分量の影響

図-8 ならびに図-9 は、それぞれ材齢 7 日、材齢 3 日まで水中養生した石灰岩砕砂モルタルにおいて微粒分量の違いが $w-\epsilon$ 曲線に与える影響を示したものである。いずれの養生期間においても石灰岩砕砂を用いた場合の $w-\epsilon$ 曲線は微粒分量が減少するほど横軸正方向へ移動するようになっている。このことは、質量減少よりも収縮の方に寄与するような水が存在している、すなわち、石灰岩砕砂の微粒分が増えるほどセメントペーストの微細な空隙に存在する水が逸散していることを示唆している。したがって、石灰岩砕砂の微粒分がセメントの水和に関与して、セメントペーストの空隙組織を微細なものにしたのではないかと推察できる。

石灰石微粉末をセメント混和材として用いた場合にはエアライトの初期水和が促進されることが報告されており、石灰石微粉末を加えることで初期材齢におけるセメント硬化体の強度が増進することも確認されている^{6), 7)}。このような石灰石微粉末による初期水和の促進機構としては、石灰石微粉末がエアライトと直接反応しているのではなく、石灰石微粉末が水和物の析出場所となってエアライト表面に生成する C-S-H 層の厚さを相対的に減少させることで、エアライトの水和が減速することを抑制できるためと考えられている(核生成における微粉末添加効果)^{8), 9)}。また、石灰石微粉末の粒度が細骨材程度のときは初期水和をあまり促進しないが、粒度が小さくなるほど初期水和を大きく促進することも報告されている^{10), 11)}。

ここで、本研究に使用した石灰岩砕砂の微粒分(0.075mmの網ふるいを通すもの)は、化学成分・鉱物組成がコンクリート用混和材として利用されている石灰石微粉末とまったく同一であることは自明である。また、石灰岩砕砂の微粒分は、平均粒径 $6.9\mu\text{m}$ ならびに比表面積 $5650\text{cm}^2/\text{g}$ となる粉体であったことが試験に

て確認できたことも勘案すると、コンクリート用混和材としての石灰石微粉末とほとんど同等の性能を有していたと考えてよいものといえる。このことから、石灰岩砕砂に含まれている微粒分は前述したような核生成における微粉末添加効果をもって、セメントの初期水和を促進して初期の空隙組織の緻密化に関与したのではないかと推察できる。実際に石灰岩砕砂(粗骨材)を用いたコンクリートでは砕砂の微粒分量が増加すると初期の圧縮強度が増進することも確かめられている¹²⁾。なお、図-8 から、石灰岩砕砂の微粒分量が多い方が乾燥期間 91 日における乾燥収縮ひずみは増加する傾向が認められており、このことにも石灰岩砕砂の微粒分によるセメントペースト硬化組織の構造変化が関与しているものと思われる。

図-10 ならびに図-11 は、それぞれ材齢 7 日、材齢 3 日まで水中養生した安山岩砕砂モルタルにおいて微粒分量の違いが $w-\epsilon$ 曲線に与える影響を示したものである。いずれの養生期間においても安山岩砕砂を用いた場合の $w-\epsilon$ 曲線は微粒分量によって横軸方向へ平行移動することはなく、微粒分量にかかわらずほとんど同じ挙動で一致している。このことは、安山岩砕砂の微粒分は石灰岩砕砂の微粒分のようにセメントの初期水和を促進する働きをもたず、初期の空隙組織にも変化を与えなかったものと考えられることができる。

図-12 ならびに図-13 は微粒分量が異なる石灰岩砕砂ならびに安山岩砕砂を用いたモルタルの乾燥開始前(水中養生材齢 7 日ならびに水中養生材齢 3 日)における空隙径分布をそれぞれ示したものである。いずれの水中養生期間においても、石灰岩砕砂を用いたモルタルでは微粒分量が増加するほど空隙量が低減して空隙組織の緻密化を生じているものの、安山岩砕砂を用いたモルタルでは微粒分によって空隙組織はほとんど変化していないことがわかる。

これらのモルタル硬化体における空隙径分布のデータは、図-8 ならびに図-9 において石灰岩砕砂を用いた場合にその石灰岩砕砂の微粒分量によって $w-\varepsilon$ 曲線が移動・変化したこと、あるいは図-10 ならびに図-11 において安山岩砕砂を用いた場合にはその安山岩砕砂の微粒分量によらず同じ $w-\varepsilon$ 曲線に一致したことなどと良く整合する結果となっている。このことは、骨材(砕砂)の岩種によって微粒分が硬化体の空隙組織構造に違いを与えており、その結果として硬化体の乾燥収縮挙動も変化することを裏付けていると考える。

4. まとめ

本研究では、微粒分量が異なる石灰岩砕砂を用いたモルタルの乾燥収縮について、安山岩砕砂を用いた場合と比較する形で検討した。本研究で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 石灰岩砕砂を用いたモルタルでは、砕砂中の微粒分量が少ないほど、乾燥収縮が小さくなる傾向を示した。
- (2) 砕砂中の微粒分量が 3%程度で同一となる石灰岩砕砂ならびに安山岩砕砂を用いたモルタルを比較すると、石灰岩砕砂を用いた場合の方が乾燥収縮は小さくなる傾向を示した。
- (3) 石灰岩砕砂を用いたモルタルでは微粒分量によって乾燥収縮ひずみと逸散水量の関係が変化するものの、安山岩砕砂を用いた場合には微粒分量によらず乾燥収縮ひずみと逸散水量の関係はほぼ一定となった。
- (4) 石灰岩砕砂を用いたモルタルでは微粒分量が増加するほど硬化モルタルの空隙量が低減して組織緻密化を生じているものの、安山岩砕砂を用いたモルタルでは微粒分によって空隙組織は変化しなかった。

参考文献

- 1) 石灰石鉱業協会：石灰石骨材とコンクリート 増補・改訂版, p.7, 2005.
- 2) 坂井悦郎, 大門正機：コンクリート用材料, コンクリート工学, Vol.40, No.5, pp.39-46, 2002.
- 3) 長塩靖祐, 藤田仁, 吉本稔, 伊與田紀夫：産地の異なる石灰石粗骨材を使用したコンクリートのフレッシュ性状および強度性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.129-134, 2007.
- 4) 鶴田昌宏, 中村秀三, 小嶋明：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物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.99-104, 2004.
- 5) 高木亮一, 長塩靖祐, 吉本稔, 伊與田紀夫：石灰石粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.81-86, 2008.
- 6) I. Soroka and N. Stern : Calcareous Fillers and The Compressive Strength of Portland Cement, Cement and Concrete Research, Vol.6, No.3, pp.367-376, 1976.
- 7) 下林清一, 岩渕俊次：セメント強さにおよぼす石灰石微粉末の影響, セメント技術年報, No.33, pp.84-87, 1979.
- 8) 後藤孝治, 星野清一, 小澤尚志：エーライトの水和におよぼす鉱物質微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.42-47, 1998.
- 9) セメント協会：石灰石微粉末専門委員会報告書, pp.7-16, 2001.
- 10) 久我比呂氏, 浅賀喜与志：ポルトランドセメントの水和反応に及ぼす無機微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.62-67, 1996.
- 11) 浅賀喜与志, 久我比呂氏：粒度の異なる炭酸カルシウム添加がセメントの水和反応に及ぼす影響, No.51, pp.20-25, 1997.
- 12) 長塩靖祐, 藤田仁, 吉本稔, 伊與田紀夫：石灰石粗骨材の微粒分量がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.99-104, 2008.