

論文 様々な環境条件下での増粘剤系高流動コンクリートの収縮性状について

小野賢太郎^{*1}・松本典人^{*2}・佐野清史^{*3}・宮川豊章^{*4}

要旨:セルロース系増粘剤を用いた高流動コンクリートの収縮性状を調べるため、増粘剤を添加したモルタルおよびコンクリートの自己収縮および乾燥収縮について、無添加のものと比較検討した。また、養生・環境条件の相違が増粘剤を添加したモルタルの収縮性状に与える影響も調べた。モルタルの場合、増粘剤添加により自己収縮および乾燥収縮が若干大きくなったが、コンクリートでは、増粘剤添加の有無に関わらず同等の収縮性状を示した。また、環境温度等によりモルタルの収縮性状が変化することがわかった。

キーワード:セルロース系増粘剤、高流動コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、毛細管空隙

1. はじめに

近年、コンクリートの締固め不要を目指した高流動コンクリートの研究開発が進められ、実施工への適用例も増加している。しかし、粉体系高流動コンクリートは、乾燥収縮は小さいものの、単位結合材量が多いため、コンクリート構造物の耐久性や美観を低下させるひび割れの発生要因の1つである自己収縮が大きいとの報告が多数見られる¹⁾。

一方、増粘剤系高流動コンクリートは、乾燥収縮が大きいとの報告が多く見られるものの、通常のコンクリートと同程度の水セメント比で製造できるため、自己収縮が増大する懸念は少ないと考えられている。しかし、増粘剤の添加がコンクリートの収縮性状、特に自己収縮に与える影響に関する研究例は十分にあるとは言えないのが現状である。

本研究は、セルロース系増粘剤の添加がコンクリートの収縮性状に与える影響を調べるため、増粘剤系高流動コンクリートおよびコンクリート中のモルタルの自己収縮および乾燥収縮について、増粘剤を添加しないものとの比較検討を行ったものである。また、施工条件などを考慮して設定した5種類の養生・環境条件下での増粘剤系高流動コンクリート中のモルタルの収縮性状についても調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料およびコンクリートの配合を表-1 および表-2 に示す。コンクリートの配合は、同一水セメント比(50%)で増粘剤添加量 $W \times 0, 0.2, 0.3\%$ の3種類、および同一増粘剤添加量($W \times 0.2\%$)の配合条件で水セメント比 45, 50, 55% の3種類とした。高流動コンクリートは、単位水量 185kg/m^3 、単位粗骨材量 320l/m^3 、高性能 AE 減水剤量 $C \times 2.8\%$ の条件で統一した。高性能 AE 減水剤添加量は、増粘剤添加量 $W \times 0.2\%$ の配合(配合 50VA2)において、

表-1 使用材料

項 目	仕 様
セメント C	比較ポルトランドセメント 比重:3.15,比表面積:3380 cm^2/g
粗骨材 G	滋賀県土山産 比重:2.64 吸水率:1.08% F.M.:6.47
細骨材 S	滋賀県野洲川産 比重:2.83 吸水率:0.83% F.M.:3.58
高性能 AE 減水剤 SP	ポリアルキルカルボン酸エーテルと 架橋ポリマー複合
増粘剤 VA	低界面活性型水溶性セルロースエーテル 2%水溶液粘度:10,000cp

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東洋建設(株)美浦研究所材料研究室研究員 (正会員)

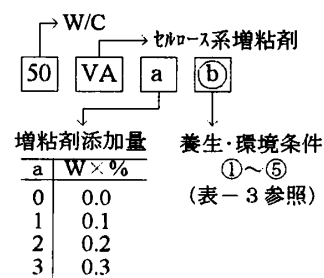
*3 東洋建設(株)美浦研究所材料研究室長 (正会員)

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻, 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

No.	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				VA (C×%)	SP (C×%)	
				W	C	S	G			
1	50VA0	50	51.0	185	370	859	845	—	0.9	
2	50VA2							0.2	2.8	
3	50VA3							0.3		
4	45VA2	45	50.0		411	826		0.2		
5	55VA2	55	51.7		336	885				

【記号の説明】



スランブフローが $60 \pm 5\text{cm}$ となるように調整した。また、比較用の増粘剤を添加しないコンクリート(配合 50VA0 以下、比較コンクリート)は、スランブの目標値が $8 \pm 2.5\text{cm}$ となるように高性能 AE 減水剤添加量を調整した。いずれのコンクリートも空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ となるように AE 助剤で調整した。なお、供試体作製に用いたモルタルは、フレッシュコンクリートを 5mm のふるいを用いてウェットスクリーニングして採取した。

2.2 養生・環境条件

供試体の養生・環境条件は、通常の自己収縮や乾燥収縮試験で用いられる条件、および施工現場での養生条件を考慮し、表-3 に示す 5 種類の養生・環境条件を設定した。

表-3 養生・環境条件

CASE	材齢	1	→	7	→	28	→	91
①	打設	脱型	水中 20°C					
②	打設	脱型	水中 20°C		20°C 80%RH			
③	打設	脱型	封緘 20°C		20°C 80%RH			
④	打設	脱型	封緘 20°C		20°C 80%RH			
⑤	打設	脱型	封緘 40°C		20°C 80%RH			

2.3 水和収縮試験

試験は、水セメント比が 50% で増粘剤添加量が $W \times 0, 0.2, 0.3\%$ (配合: 50VA0, 2, 3) の 3 種類のセメントペーストについて、20°C および 40°C 恒温室内で行った。試験方法は、日本コンクリート工学協会が提案された方法²⁾を用いて行った。

2.4 長さ変化試験

試験は、各要因につき $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ のモルタル供試体 3 本を用いて行った。また、コンクリートについても配合: 50VA0, 2, 3 の 3 種類を用い養生・環境条件③について実施した。

封緘養生した場合の長さ変化試験用の供試体は、図-1 に示すように、底面に厚さ 1mm のテフロンシートを敷設した後、全面に厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを入れ、埋込み型ひずみ計、あるいはゲージプラグを埋め込んだ。モルタルを打ち込んだ後、24 時間経過後、脱型し、供試体全面を厚さ 0.05mm のアルミ箔テープでシールし、さらにビニルで供試体を覆い、密閉封緘した。

長さ変化の測定は、モルタルの凝結始発から脱型までは、埋込み型ひずみ計で測定し、その後はコンタクトゲージ法により行った。

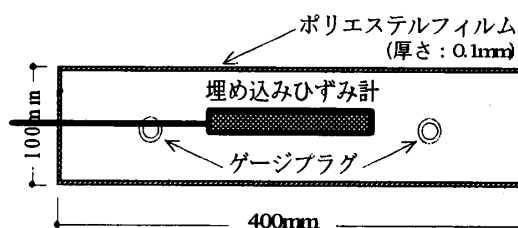


図-1 長さ変化試験用供試体

2.5 細孔径分布

試験は、表-3 に示す養生・環境条件下で静置した $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ のモルタル供試体を材齢 1, 7, 28 日経過した時点で、約 $10 \times 10 \times 10\text{mm}$ の立方体に切断したものを試料として、水銀圧入式ポロシティーメータによる水銀圧入法により細孔径分布の測定を行った。なお、封緘養生供試体は、モルタル供試体の全面にアルミ箔テー

プを巻きつけ、さらにその上からビニルで覆って密閉封緘した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートおよびモルタルの基本特性

各種コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す。高流動コンクリートについて、スランプフローは、増粘剤添加量の多い配合 50VA3 のコンクリート、および単位セメント量が少ない配合 55VA2 のコンクリートが小さくなった。凝結始発時間は、増粘剤添加量や水セメント比の相違による顕著な差は認められなかった。また、高流動コンクリートのブリーディング率はいずれも 0.0%であった。

各種モルタルの圧縮強度試験結果を図-2に示す。配合 50VA0,2,3 のモルタルの養生・環境条件③の結果から、増粘剤添加量の相違が圧縮強度に与える影響は小さいと考えられた。また 50VA2 のモルタルの養生・環境条件①～⑤の結果から、密

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

配 合	スランプ フロー (cm)	AIR (%)	凝結時間		コンクリート 温度 (℃)
			始発 (hr)	終結 (hr)	
50VA0	7.5*)	5.0	5.0	6.5	19
50VA2	65.0	4.5	13.0	15.0	19
50VA3	51.0	4.8	12.0	14.0	16
45VA2	64.5	4.5	12.0	14.0	19
55VA2	56.5	5.4	12.0	14.0	16

*)スランプ

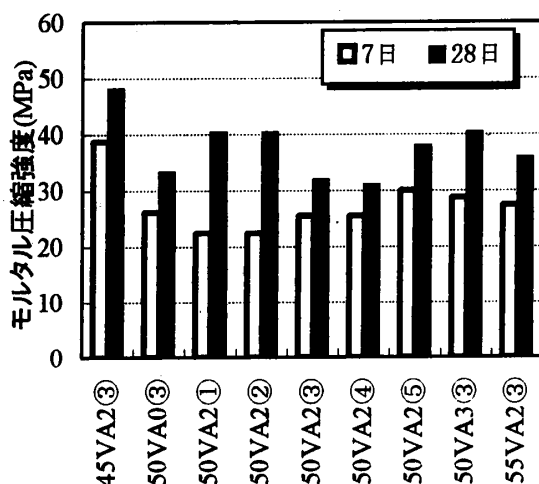


図-2 モルタルの圧縮強度

閉封緘養生や気中養生したものは、水中養生したものに比べて、材齢 7 日から 28 日までの強度の増進が小さく、材齢 28 日の圧縮強度が小さくなった。

3.2 セメントペーストの水和収縮率

水和収縮試験の結果を図-3に示す。水和収縮率($S_m(\%)$)は、サンプル瓶に投入したセメントペーストの容積($V_p(cc)$)に対するメスピペットで測定した添加水の変化量($H_w(cc)$)の比として求めた。

増粘剤を添加したセメントペースト(配合: 50VA2,3③)の水和収縮率は、比較セメントペースト(配合: 50VA0③)に比べて、試験開始後 24 時間までは若干小さくなったが、その後大きくなった。これは、前者が増粘剤の添加によって、凝結遅延したことに起因し、後者が増粘剤の潤滑作用に伴い、水和するセメントの分散性が高まったためと考えられる。また増粘剤添加量の相違による水和収縮率の顕著な差は認められなかった。

40℃環境で試験を行ったセメントペースト(配合: 50VA2⑤)は、20℃環境のセメントペースト(配合: 50VA2③)と比べて、水和収縮率が試験開始後 24 時間まで大きい、その後の水和収縮率の増進は小さくなり、ほぼ同等となった。これは、高温環境では、水和反応が促進されたためと考えられる。

3.3 モルタルおよびコンクリートの長さ変化

増粘剤を添加したモルタルおよびコンクリートの長さ変化を図-4に示す。増粘剤を添加したモルタルは、比較モルタルに比べて、材齢 28 日までの長さ変化(自己収縮)が大きく、材齢 28 日以降の長さ

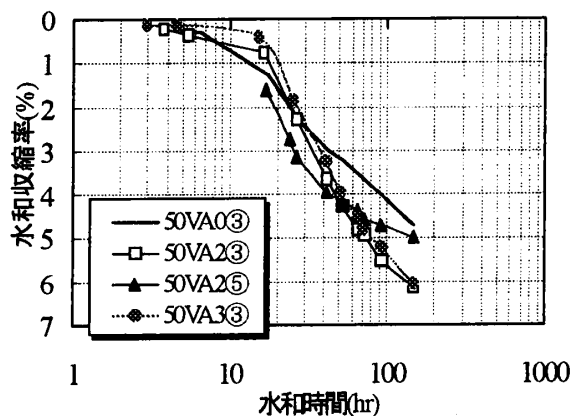


図-3 セメントペーストの水和収縮率の経時変化

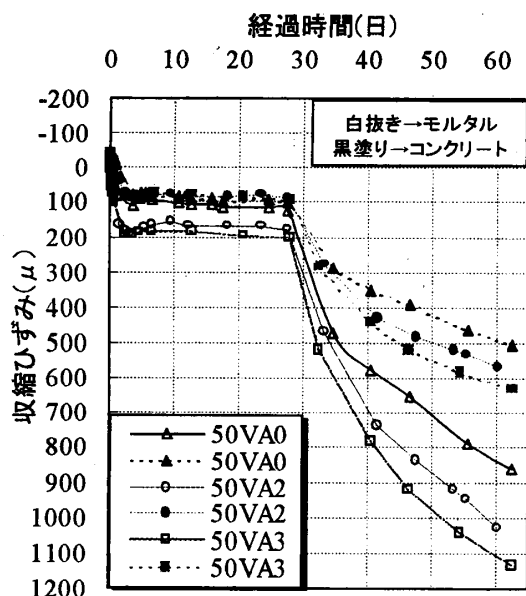


図-4 増粘剤添加量が長さ変化に与える影響

変化(乾燥収縮)も大きくなる傾向を示し,これらを合わせた長さ変化量が約2ヶ月経過時点で200 μ 程度大きくなった。一方,増粘剤を添加したコンクリートは,比較コンクリートに比べて,自己収縮ひずみがほぼ同等,乾燥収縮ひずみは数十 μ 程度大きくなる傾向を示した。これは,コンクリートの場合,粗骨材の混入により収縮量が抑制されたため,モルタルの場合に比べて,いずれのケースも長さ変化量が約1/2となり,増粘剤添加の有無による顕著な差が認められなくなったものと考えられる。

配合50VA2のモルタルにおける,各養生・環境条件ケースの長さ変化を図-5に示す。水中養生(養生・環境条件①,②)したモルタルは,膨張する傾向を示した。これは,外部から水が供給されることから,モルタル中の空隙は常に水で満たされ,後述するように,材齢経過に伴い水和反応によって細孔径が小さくなったことから,空隙に膨張圧力が作用したためと考えられる。

養生・環境条件⑤の材齢7日までの長さ変化は,水和収縮率と同様に,水和反応の促進に起因して,他のケースに比べて大きくなった。

養生・環境条件②,③の材齢28日以降および養生・環境条件④の材齢7日以降の約2ヶ月経過時点までの長さ変化を比べると,養生・環境条件③

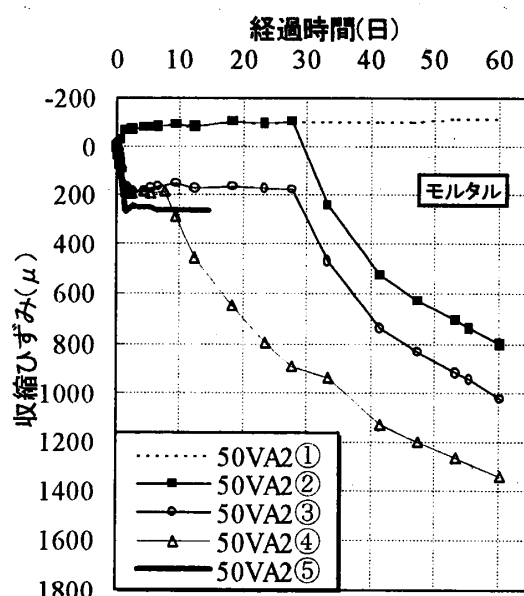


図-5 養生・環境条件が長さ変化に与える影響

＜②＜④の順で長さ変化が大きくなった。養生・環境条件③,④について,供試体を密閉封緘した場合,水和反応に起因した自己乾燥によりモルタル中の水分量が減少するが,水和反応が十分に進んでいない材齢初期では,後述するように,モルタル中の空隙量が多く,また細孔径が比較的大きいことから水分が逸散しやすい状態となり,乾燥収縮が大きくなるものと考えられる。また養生・環境条件②は,外部から水が供給されることから,モルタル中の空隙は常に水で満たされた状態にあることから養生・環境条件③と比べて,モルタル中の水分量が多くなったためと考えられる。自己収縮および乾燥収縮を合わせたモルタルの長さ変化は,養生・環境条件④が大きく,養生・環境条件②と比べて500 μ 程度大きくなり,モルタルあるいはコンクリートの養生・環境条件の相違が収縮性状に影響を与えるものと考えられる。

配合45VA2,50VA2および55VA2のモルタルの材齢55日までの長さ変化を図-6に示す。モルタルの28日材齢までの自己収縮は,水セメント比が小さい(単位セメント量の多い)配合ほど大きくなったが,それ以降の乾燥収縮は,水セメント比が最も大きい配合55VA2のモルタルが大きくなった。自己収縮と乾燥収縮を合わせた材齢55日の長さ

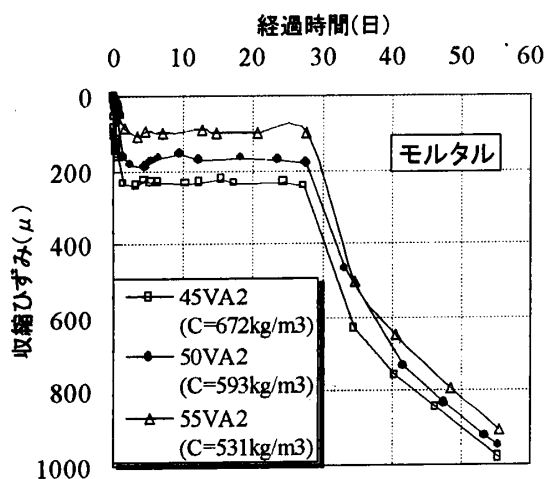


図-6 単位セメント量が長さ変化に与える影響

変化は、いずれもほぼ同等となった。

3. 4 毛細管空隙分布

配合 50VA0,2,3 モルタルの単位ペースト量当りの毛細管空隙分布(細孔径 6nm~2 μ m)を図-7に示す。材齢 1 日において、増粘剤を添加したモルタルは比較モルタルに比べて、全空隙量が若干多い。これは、増粘剤の添加により凝結が遅延したためと考えられる。材齢 7,28 日において、増粘剤を添加したモルタルは比較モルタルに比べて、全毛細管空隙量が若干少なく、比較的小さな空隙領域(細孔

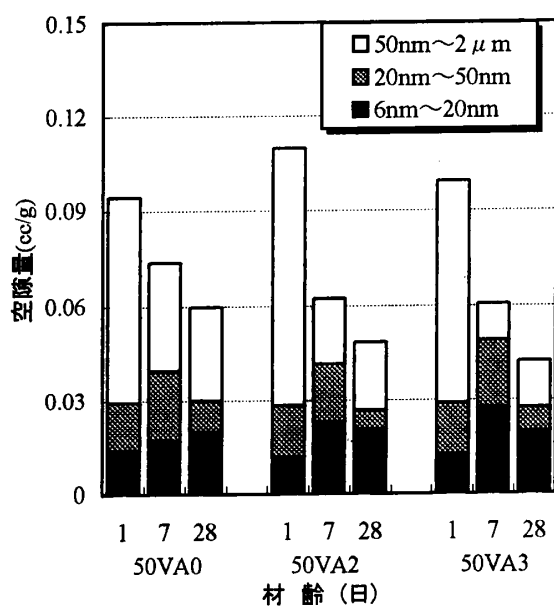


図-7 配合 50VA0,2,3 のモルタルの
毛細管空隙分布

径 6nm~50nm)の占める割合が高い。また、増粘剤添加量の相違でみると、増粘剤添加量が多いモルタルの全毛細管空隙量は若干少なく、細孔径 50nm 以下の空隙領域が占める割合は高く、増粘剤の添加によって、硬化モルタル中の組織が若干緻密になる傾向を示した。

配合 50VA2 のモルタルの各種養生・環境条件における単位ペースト量当りの毛細管空隙分布を図-8に示す。材齢 7 日では、水中養生(②)と 20℃環境下で封緘養生(③,④)したモルタルの毛細管空隙分布の顕著な差は認められなかった。40℃環境下で封緘養生(⑤)したものは、全毛細管空隙量が少なく、細孔径 50nm 以上の空隙領域が多く、また材齢の経過に伴う毛細管空隙分布の変化は認められなかった。これは、40℃環境下では、 C_2S の水和が促進され⁴⁾、また、エトリンガイトや $Ca(OH)_2$ などの結水量が多い水和物を生成する材齢初期に自由水が多く消費されるため⁵⁾、材齢経過に伴う水和の進行が抑制されたものと考えられる。養生・環境条件③と④を比べると、材齢 7 日以降、乾燥状態にあった養生・環境条件④は、乾燥による水分の逸散による影響により、材齢 28 日の全毛細管空隙量が多く、50nm 以上の空隙領域が占める割合が高く

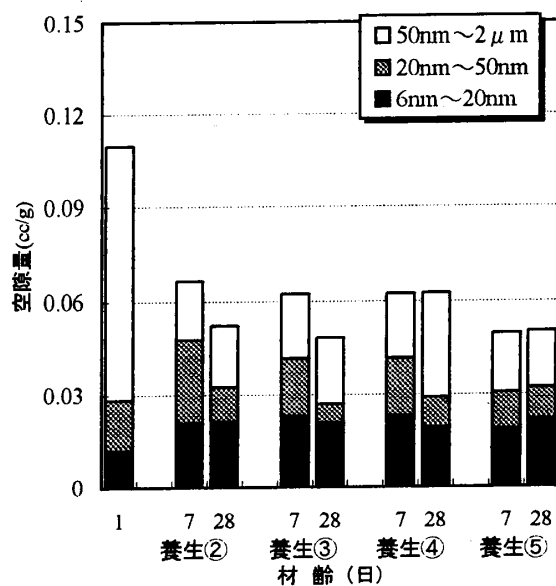


図-8 配合 50VA2 のモルタルの
毛細管空隙分布

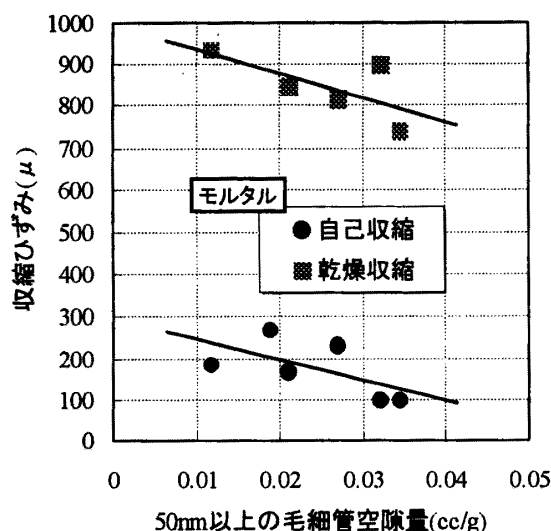


図-9 50nm以上の毛細管空隙量と
モルタルの収縮の関係

なった。

3. 5 収縮性状と微細構造の関係

材齢 7 日における硬化モルタル中の細孔径 50nm 以上の毛細管空隙量と自己収縮および乾燥収縮の関係を図-9 に示す。自己収縮および乾燥収縮は、細孔径 50nm 以上の毛細管空隙が少ないほど大きくなる傾向が認められる。自己収縮が大きいものは、粗大な毛細管空隙が減少し、細孔径 50nm 以下の小径の毛細管空隙が多くなり、毛細管張力が大きくなったためと考えられる¹⁾。また、乾燥収縮は、水分が逸散しやすい細孔径 50nm 以上の毛細管空隙の影響を受ける⁶⁾ことが本実験からも認められた。しかし、モルタルおよびコンクリートの収縮性状は、硬化体中の水分量や反応生成物などの影響を受けることから、さらに検討を加える必要があろう。

4. まとめ

本実験の範囲内でわかったことを以下に示す。

- (1) 増粘剤を添加したセメントペーストは、増粘剤を添加しないものに比べて、水和収縮率が試験開始から 24 時間までは若干小さいが、それ以降は大きくなる傾向を示した。
- (2) 40℃環境における増粘剤を添加したセメントペーストは、20℃環境のものに比べて、試験開始か

ら 24 時間までの水和収縮率が大きい³⁾が、それ以降の増加量は小さい。

- (3) 増粘剤を添加したモルタルは、増粘剤を添加しないものと比べて、自己収縮が大きくなる傾向を示したが、増粘剤を添加したコンクリートの自己収縮は、添加しないものとはほぼ同等となった。
- (4) モルタルの収縮性状は、養生・環境条件の相違によって異なり、特に 40℃環境では 20℃環境に比べて自己収縮が大きく、乾燥開始時期が早いものは約 2 ヶ月経過時点の乾燥収縮が大きくなった。
- (5) 増粘剤を添加したモルタルの微細構造は、増粘剤を添加しないものに比べて、材齢 1 日では全毛細管空隙量が多く、比較的大きな空隙領域の占める割合が高かったが、それ以降は、全毛細管空隙量は少なくなり、比較的小さい空隙領域の占める割合が高くなった。
- (6) モルタルの微細構造の変化から、40℃環境では、20℃環境に比べて、初期の水和反応が促進され、その後の材齢経過に伴う水和の反応が抑制されたことが認められた。

参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤伸吾, 佐藤 剛, 小西謙二郎: コンクリート工学, Vol.14, No.1, pp561-567, 1992.6
- 2) 自己収縮委員会: 自己収縮委員会報告書, 日本コンクリート工学協会 pp191-194, 1996.11
- 3) 高橋俊之, 中田英喜, 吉田孝三郎, 後藤誠史: セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響, コンクリート工学論文集, 第 7 巻, 第 2 号, pp.137-142, 1996.7
- 4) 浅賀喜与志, 大門正機, 小西和夫, 吉田孝三郎: 低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.58-63, 1991
- 5) 高ビーラド系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究, コンクリート工学論文報告集, Vol.15, No.1, pp.143-148, 1993.6
- 6) 羽原俊祐: コンクリートの構造とその物, わかりやすいセメント科学, (財)セメント協会, pp78-102, 1993