

論文 吸水高分子ゲルを添加したモルタル・コンクリートの内部養生に関する基礎研究

徳 良介*1・竹中 寛*2・笠井 哲郎*3

要旨：初期材齢における適切な湿潤養生期間を確保することでコンクリートの自己収縮の低減および強度発現性の向上を指向し、主成分がカルボキシルメチルセルロースとポリビニルアルコール 2 種類の吸水高分子ゲルを添加したモルタル・コンクリートに関し、内部養生効果について検討を試みた。その結果、飽水状態の吸水高分子ゲルを添加することで、モルタル・コンクリートの圧縮強度は同等か僅かに増加し、自己収縮、乾燥収縮とも小さくなるなど、吸水高分子ゲルの内部養生材としての有効性が明らかとなった。

キーワード：吸水高分子ゲル, CMC, PVA, 内部養生, 圧縮強度, 自己収縮, 乾燥収縮

1. はじめに

近年、構造物の高層化・超スパン化に伴い、コンクリートの高強度化が要求されている。しかし、設計基準強度 (Fc) 60N/mm^2 を超えるような高強度コンクリートは自己収縮が大きく、実際の構造物では自己収縮に起因するひび割れが問題となっている。このひび割れは、コンクリートの機能性の低下や防水性の低下、鉄筋の腐食、美観の低下など様々な悪影響につながるものである。この自己収縮を抑制・低減させる方法として、収縮低減剤や膨張材の使用および保水性粒子をコンクリート中に配置し、内部から水分を供給し自己乾燥の低減を指向した内部養生法が検討されている。内部養生材としては軽量骨材^{1),2)}、再生骨材³⁾、廃瓦⁴⁾、および高吸水性ポリマー^{5),6),7),8)}など吸水性の高い材料の使用が検討されている。

また、コンクリートの品質を確保するための重要な工程として、打込み後の湿潤養生がある。湿潤養生の目的は、コンクリートの硬化過程における乾燥防止とセメントの水和が進行するための十分な水の確保である。このため、土木学会コンクリート標準示方書や日本建築学会 JASS5 鉄筋コンクリート工事には、湿潤養生を行う期間として、「普通ポルトランドセメントで 5 日間以上」と規定されている。また、湿潤養生方法として、水中、湛水、散水、湿布、湿砂、膜養生などが挙げられるが、構造物の規模や形状および環境条件等によって、十分な養生効果が発揮されない場合がある^{9),10)}。

一方、著者らは生分解性吸水高分子ゲルをコンクリートの初期材齢における塗膜養生剤として、および内部養生剤としての検討を行っており、プラスチック収縮や低水結合材比コンクリートの自己収縮が低減するなど、その有効性を明らかにした^{11),12)}。本研究では、これまで検討したカルボキシルメチルセルロース (以下 CMC) を主

成分とするゲルに加え、新たにポリビニルアルコール (以下 PVA) を主成分とする吸水高分子ゲル (以下ゲル) の 2 種類を用い、それらの内部養生効果について検討を試みた。これらの吸水高分子ゲルは、CMC または PVA をそれぞれ水と混合し、電子線や γ 線を照射することで、高分子の架橋構造を形成して製造される。これらのゲルを添加したモルタルまたはコンクリートに関し、セメントの水和特性、凝結特性、強度発現性、自己収縮、乾燥収縮等に関し実験的評価を行い、2 種類のゲルの内部養生材としての有効性について比較・検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、水セメント比が 55% のセメントペースト、40% と 55% のモルタルの場合は普通ポルトランドセメントを、モルタル・コンクリートの水セメント比 25% の場合はシリカフェュームプレミックスセメントをそれぞれ使用した。使用材料を表-1 に示す。使用したゲルは、CMC を主成分とする吸水倍率 6.50 倍 (GC) と PVA を主成分とする吸水倍率 6.55 倍 (GP) の 2 種類を使用した。ゲルの吸水倍率は、絶乾状態からの水道水の吸水量を質量比で示した値である。

2.2 ゲルの吸水特性

使用したゲルの GC を写真-1 に、GP を写真-2 に示す。両写真は、シャーレにそれぞれ 10 g のゲルと 50cc の水道水を加え、30 秒間葉さじで拡散させた後 5 分間静置した状態である。写真より、GC に比べ GP は水中で分散しにくく凝集した状態となった。

図-1 は GC に図-2 は GP に吸水させる水を水道水 (W_2) とした場合と、水酸化カルシウム飽和溶液 (W_3) とした場合における吸水倍率の測定結果を示したもので

*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻 (学生会員)

*2 東洋建設 (株) 美浦研究所 主任研究員 博 (工) (正会員)

*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

	記号	種類	物理的・化学的性質
練混ぜ水	W ₁	上水道	
吸水高分子ゲルへの供給水	W ₂	上水道	
吸水高分子ゲルへの供給水	W ₃	水酸化カルシウム飽和溶液	強アルカリ性
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
	PM	シリカフェュームプレミックスセメント	密度3.09g/cm ³
細骨材	S	菊川支流産山砂	表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率2.18%
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩砕石	表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率0.62%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル
吸水高分子ゲル	GC	カルボキシメチルセルロース(GMC)	吸水倍率6.50倍(吸水率60.7%)
	GP	ポリビニルアルコール(PVA)	吸水倍率6.55倍(吸水率79.8%)



写真-1 GC



写真-2 GP

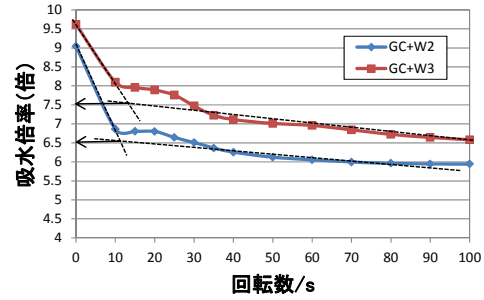


図-1 GCの吸水倍率

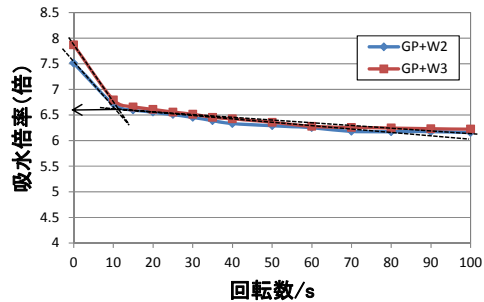


図-2 GPの吸水倍率

ある。ゲルの飽和吸水倍率の測定は、10gのゲルに190gのW₂またはW₃を加え5分間静置し十分に吸水させた後、遠心分離機を用いて回転数を徐々に上げ水分を除去した。各回転数の除去された水分の質量を測定し、間隙水とゲルが吸水した水の除去過程の交点を求め、この交点の値をゲルの飽和吸水倍率とした。図より、両ゲルにおいてW₂とW₃の吸水倍率は、GCでは順に6.50倍、7.50倍となりW₃を吸水させた場合の方が僅かに大きくなった。一方、GPの吸水倍率はW₂、W₃ともに6.55倍となった。一部の吸水ポリマーでは、Ca²⁺イオン等により吸水能が低下することが指摘されているが¹³⁾、上述の結果より、本研究のゲルではCa²⁺等による吸水性能の低下は生じず、モルタル・コンクリート中においてもゲルの吸水性能は発揮されるものと推察される。

2.3 配合

セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの配合を表-2、表-3および表-4にそれぞれに示す。なお、ゲルは絶乾状態の添加率である。セメントペーストおよびモルタルにおいては、ゲルをそれぞれセメントの質量に対し0.05%で添加した。また、コンクリートにおいてはゲルの添加率を0.025%、0.05%および0.1%の3条件とした。

2.4 練混ぜ方法

セメントペーストおよびモルタルの練混ぜは、ホバート型ミキサーを用いた。練混ぜ手順をそれぞれ図-3、図-4に示す。コンクリートの練混ぜは、パン型強制ミキサーを用いた。練混ぜ手順を図-5に示す。ゲルの添加方法は、ゲルに飽和水量分の水を吸水させて行い、この際、ゲルに吸水させた水量分を練混ぜ水から差し引いた。

2.5 試験項目および方法

セメントペースト、モルタルおよびコンクリートに関

表-2 セメントペーストの配合

配合名	ゲル	添加率(C×%)
50-0	—	—
50-GC-0.05	GC	0.05
50-GP-0.05	GP	

表-3 モルタルの配合

配合名	W/C (%)	セメント	S/C (%)	SP添加率 (C×%)	ゲル	ゲル添加率 (C×%)
40-0	40	N	2.4	1.0	—	0.05
40-GC-0.05					GC	
40-GP-0.05					GP	
55-0	55			0.0	—	0.05
55-GC-0.05					GC	
25-0	25	PM	1.9	1.3	—	0.05
25-GC-0.05				1.5	GC	
25-GP-0.05				1.6	GP	

して実施したフレッシュおよび硬化体に関する試験項目を表-5に示す。自己収縮試験における供試体の密閉条件は、日本コンクリート工学協会「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(改訂版2002)」¹⁴⁾の規定に準拠し、モルタルおよびコンクリートともに100×100×400mm鋼製型枠

表-4 コンクリートの配合

配合名	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SP (C×%)	ゲル	添加率 (C×%)
				C	W	S	G					
							5~10mm	10~15mm	15~20mm			
25-0	20	25	48.2	615	154	751	168.4	505.2	168.4	1.15	—	—
25-GC-0.025										1.2	GC	0.025
25-GC-0.05										1.3		0.05
25-GC-0.1										1.15		0.1
25-GP-0.025										1.25	GP	0.025
25-GP-0.05										1.3		0.05
25-GP-0.1												0.1



図-3 セメントペーストの練混ぜ方法



図-4 モルタルの練混ぜ方法

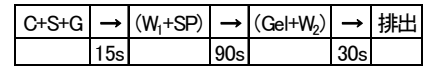


図-5 コンクリートの練混ぜ方法

表-5 試験項目

試験項目	試験方法
ゲルの吸水特性	遠心分離機を用いてゲルから除去された水の質量を測定。回転数0における吸水倍率を外挿し、この値を飽和吸水倍率とした。
水和収縮	JCI-1996「水和収縮試験方法(案)」 普通ポルトランドセメントを用いて、無添加と各ゲル0.05%づつ添加した3配合で行った。
凝結時間	JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」
圧縮強度	JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」 試験材齢28日(1日封緘27日気中, 標準養生, 7日封緘21日気中, 28日封緘)
自己収縮	JCI-1996「セメントペーストおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法」 埋め込みゲージを用いて材齢28日まで測定を行った。
乾燥収縮	自己収縮に使用した供試体を材齢29日後にアルミテープを剥がし測定を行った。
スランブフロー	JIS A 1150「コンクリートのスランブフロー試験方法」
空気量	コンクリートはJIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」

を用い、測定長 60mm の埋込み式ひずみゲージを供試体の中心に設置して測定を行った。また、測定の開始時期は各配合における凝結開始時間とした。乾燥収縮に関しては、材齢 29 日以降、自己収縮試験の供試体を脱型（アルミテープを剥がす）し、同一供試体で継続して測定を行った。測定は供試体を温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室に静置し、継続して長さ変化測定することにより行った。

3. 実験結果および考察

3.1 水和収縮

無添加, GC または GP を各 0.05% 添加したセメントペーストの収縮率の経時変化を図-6 に示す。図より、ゲルを添加した場合でも、無添加のものとは比べて水和収縮率に差は生じていない。この結果から、今回使用した両ゲルともセメントと水の水和反応を阻害させず、ゲル添加による水和反応への影響はないものと考えられる。

3.2 凝結時間

W/C=40% におけるモルタルの凝結時間を表-6 に示す。表より、ゲルを添加したモルタルは無添加のものとは比べ凝結時間の始発、終結とも僅かに早くなった。これは、ゲルの吸水水分分、モルタルの W/C が小さくなるため、凝結試験における貫入抵抗が僅かに大きくなったこと等

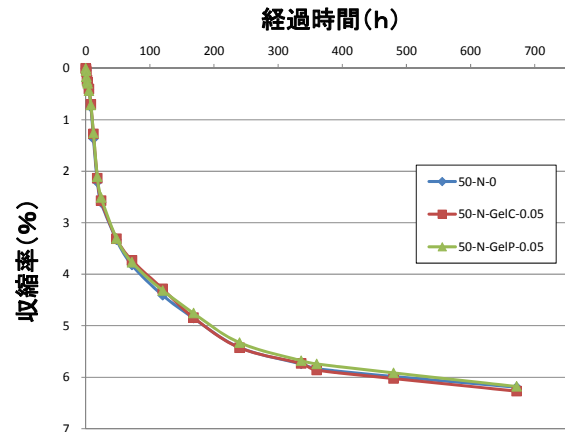


図-6 セメントペーストの水和収縮率(W/C=50%)

表-6 モルタルの凝結時間(W/C=40%)

配合名	凝結時間	
	始発	終結
40-0	4:50	6:55
40-GC-0.05	4:30	6:35
40-GP-0.05	4:25	6:30

がその要因であると考えられる。

3.3 モルタルの自己収縮ひずみ

図-7 は W/C=25% の自己収縮ひずみの経時変化を示したものである。図より、無添加に比べゲルを添加した

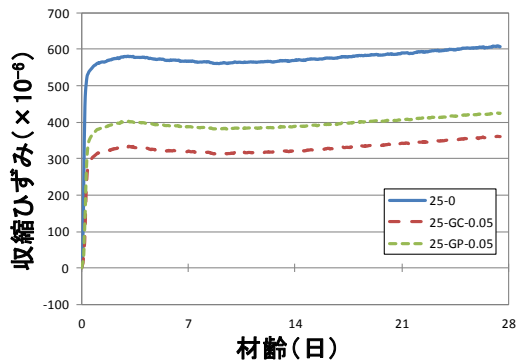


図-7 自己収縮 (W/C=25% モルタル)

モルタルは両ゲルともに収縮ひずみの低減効果は大きく表れ、GC では40%程度、GP では30%程度の収縮低減効果が得られた。両ゲルの収縮低減効果の差は、ゲルの凝集による分散の差が影響していると考えられる。

図-8 は W/C=40%の収縮ひずみの経時変化を示したものである。図より、ゲルを添加したモルタルは無添加に比べ、低減効果の程度には差があるものの、両ゲルとも収縮ひずみが小さくなっており、収縮ひずみの低減効果が見られた。無添加に対して GC では30%程度、GP では20%程度、収縮が低減した。GC と GP の収縮ひずみの低減効果に差が生じた要因の一つとして、ゲルのモルタル内での分散状態の相違があげられる。本研究で使用したゲルは GC よりも GP の方が凝集し分散しにくく(写真-1, 写真-2)、ミキサによる練混ぜ後も GC よりも GP の方が分散性が悪く、その分布に偏りが生じたため収縮ひずみ低減効果が小さくなったと推察される。

図-9 は W/C=55%の収縮ひずみの経時変化を示したものである。図より、W/C=55%の場合ではゲルの添加による収縮ひずみの低減効果は表れなかった。これは、水セメント比が高く供試体の自己乾燥が起きにくいいため、ゲルの添加による内部養生による水分供給の影響が小さいためであると考えられる。

以上の3配合の結果より、W/C=55%では収縮低減効果は表れなかった。W/C=25%, 40%では両ゲルの添加による収縮ひずみ低減効果が表れ、水セメント比が低いほどその効果は顕著であった。これは、水セメント比が低いほど自己乾燥による収縮が大きいいため、乾燥に応じてゲルが水分を供給することで、ゲルによる内部養生効果がより大きく表れたと推察される。GP は GC に比べ低減効果は小さいものの両ゲルともに内部養生効果の有効性は十分にあると考えられる。今後ゲルの粒径や添加時の練混ぜ方法、供試体内の分散状態などが内部養生効果に及ぼす影響を検討する必要がある。

3.4 コンクリートのフレッシュおよび硬化性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-7 に示す。コン

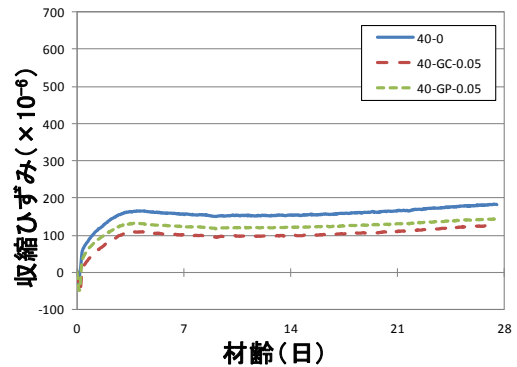


図-8 自己収縮 (W/C=40% モルタル)

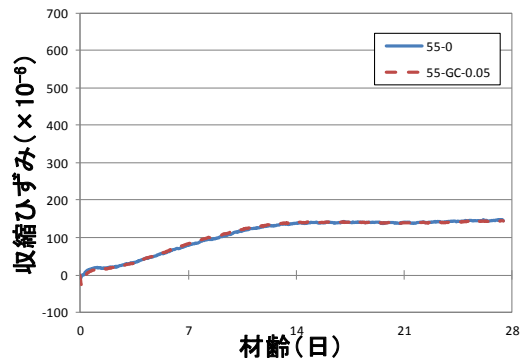


図-9 自己収縮 (W/C=55% モルタル)

表-7 コンクリートのフレッシュ性状 (W/C=25%)

配合名	スランブフロー (mm)	空気量 (%)
25-0	527	4.8
25-GC-0.025	598	4.9
25-GC-0.05	515	4.4
25-GC-0.1	529	4.1
25-GP-0.025	467	4.6
25-GP-0.05	532	4.0
25-GP-0.1	575	4.0

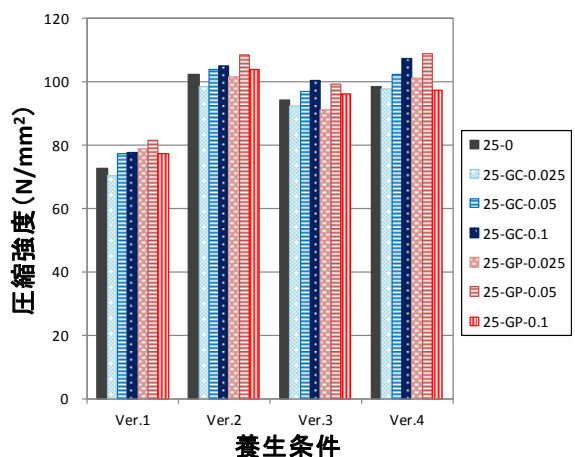


図-10 圧縮強度 (W/C=25% コンクリート)

表-8 養生条件

条件名	養生条件
Ver.1	1日封緘27日気中
Ver.2	1日封緘27日水中
Ver.3	7日封緘21日気中
Ver.4	28日封緘

クリートは高流動コンクリートとし、流動性はスランブフロー値を測定した。スランブフローの目標値は $550\pm 50\text{mm}$ とした。空気量は、GCおよびGPの場合ともゲルの添加量の増加に伴い、若干小さくなる傾向を示したが、空気量の目標値の $4.5\pm 1\%$ の範囲となった。

図-10は $W/C=25\%$ における各養生条件のコンクリートの圧縮強度の結果を示したものである。養生条件は表-8に示す通りである。図より、無添加に比べゲルを添加した場合は、GCでは添加量0.025%で圧縮強度の増加は見られずほぼ同等の強度となった。これは、ゲルの添加量が少ないため、内部養生効果によるセメントの水和促進が十分発揮されなかったものと考えられる。一方、ゲル添加量が多い添加量0.05%と0.1%では、添加量が多いほど、どの養生条件下において圧縮強度は僅かに大きくなった。GPを添加した場合は、ゲル添加量が多い0.1%で0.025%、0.05%の場合より圧縮強度が小さい値となり、GCの場合のようにゲル添加量の増加による強度増加は見られなかった。これは前述したように、GPはGCに比べ凝集し分散しにくいことから、セメントの水和を促進する内部養生効果が発揮されにくかったことに加え、コンクリート内部で凝集したゲルが硬化後に欠陥部として残存し、強度の低下を招いたものと推察できる。

3.5 コンクリートの自己収縮と乾燥収縮

$W/C=25\%$ のコンクリートの収縮ひずみの経時変化を図-11に示す。GCにおいては、どの添加率においても収縮ひずみの低減効果が確認された。無添加と比較すると、添加率0.025%では約7%程度、0.05%では約8%程度、0.1%では約19%程度の収縮低減効果が表れ、ゲルの添加率の増加に伴い低減効果は大きくなった。これは、ゲルの添加率が高いほど、セメントの水和によって生じる自己乾燥部分へ供給できる水量が多くなるためであると考えられる。一方、GPでは、添加量0.025%において収縮低減効果は見られなかった。添加量0.05%、0.1%の場合、収縮低減効果が現れたものの、この低減率はそれぞれ順に6%と7%程度となり、GCの場合より大幅に低減率は小さくなった。これは、前述の強度発現の特性と同様に、GP場合はコンクリート中での分散性が悪く、自己乾燥部分に対する適切な水分の供給がなされていないためであると考えられる。

図-12は図-11の結果から材齢29日目にアルミテープを剥がした時刻のひずみを基準とし、それ以降を乾燥収縮ひずみとして示したものである。図より、GCではゲルの添加率が高いほど乾燥収縮ひずみが小さくなり、無添加の場合の収縮ひずみに対しその低減率は、0.025%で6%、0.05%で7%、0.1%で11%程度となり、乾燥収縮の低減効果が明確に現れた。一方、GPでは0.05%で6%程度の収縮低減効果が表れたが、添加率0.025%と0.1%

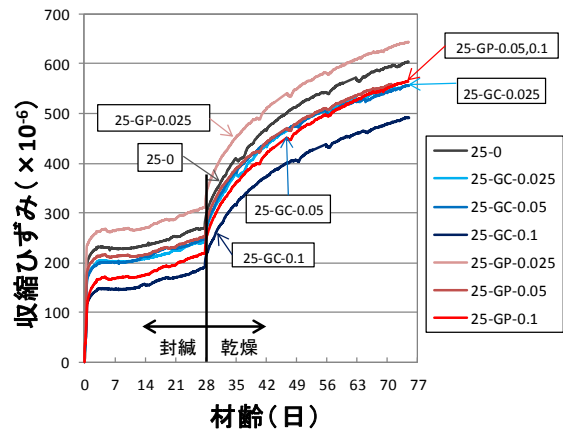


図-11 自己収縮および乾燥収縮
($W/C=25\%$ コンクリート)

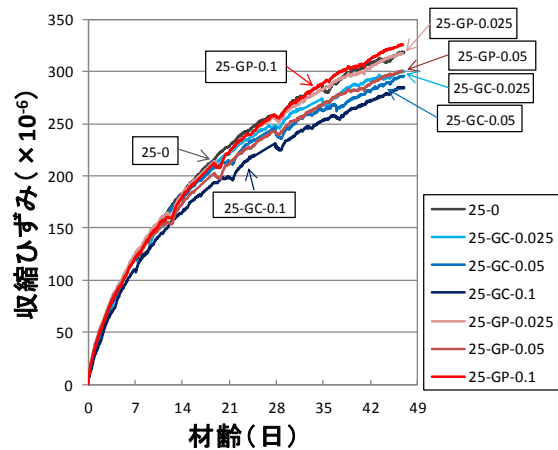


図-12 乾燥収縮 ($W/C=25\%$ コンクリート)

では無添加の場合とほぼ同程度の収縮ひずみとなり、ゲル添加による明確な乾燥収縮の低減効果は現れていない。これもこれまでと同様に、GPがコンクリート中で十分に分散していないことが原因であると推察できる。しかし、GPはモルタルにおいて収縮低減効果が発揮されていることから、コンクリート中にゲルを均一に分散させることで、より明確な内部養生効果発揮されるものと考えられる。今後、ゲルの分散性を向上させる練混ぜ方法等を検討する必要がある。

4. まとめ

吸水高分子ゲルを内部養生剤として用いたモルタル、コンクリートの強度発現性および自己収縮・乾燥収縮の低減効果について検討した結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 本研究で使用したゲルは、水酸化カルシウム飽和溶液に対しても、水道水とほぼ同等の吸水性能を示した。
- (2) 本研究で使用した両ゲルともセメントと水の水和

反応を阻害させず、ゲル添加による水和反応への影響はほとんどない。

- (3) 吸水ゲルを添加したモルタルの凝結時間は、無添加と比較すると、若干始発、終結ともに早くなった。
- (4) 吸水ゲルを内部養生剤として添加したモルタルの収縮低減効果は、W/C=40%および25%で明確に現れたが、W/C=55%では低減効果は得られなかった。また、水セメント比が小さいほどその低減効果は顕著であった。
- (5) 吸水ゲルを内部養生剤として添加したコンクリートの圧縮強度は、どの養生条件においてもGCの場合は添加量の増加に伴い僅かに増加した。GPでは、添加率増加による明確な優位性は見られなかった。
- (6) コンクリートの自己収縮および乾燥収縮は、GCでは添加量の増加に伴い低減効果は大きく表れた。GPでは、圧縮強度の場合と同様にゲル添加率増加による明確な優位性は見られなかった。

以上のことから、本研究の吸水高分子ゲルの内GCを用いることにより、コンクリートなどに与える影響は少ないながらも、十分な強度を確保しつつ、自己収縮および乾燥収縮を大幅に低減できることが判明した。また、GPに関してもモルタル・コンクリート中にゲルを均一に分散させることで、より明確な内部養生効果発揮されるものと考えられ、今後、ゲルの分散性を向上させる練混ぜ方法等を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 加藤俊充, 五十嵐心一, 川村満紀: 軽量骨材による内部養生が高強度コンクリートの内部組織形成に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.675-680, 2004
- 2) Alejandro Duran-Herrera, Pierre-Claude Aitcin, Nikola Petrov : Effect of Saturated Lightweight Sand Substitution on Shrinkage in 0.35 w/b Concrete, Materials Journal, Vol.104, No.7, pp.48-52, 2007
- 3) 柘植佐代子, 山田和夫: 吸水率の異なる再生骨材を用いたコンクリートの自己収縮に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.423-424, 2001
- 4) 鈴木雅博, 丸山一平, 川畑智亮, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.651-656, 2007
- 5) 横田光一郎, 五十嵐心一: 2, 3の超吸水性ポリマーを内部養生材として使用したモルタルの自己収縮挙動の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.508-513, 2012
- 6) 辻 正哲, 舌間孝一郎, 磯部大輔: 高吸水性高分子をコンクリート用混和材として用いた場合における養生の簡略化, 初期ひび割れ制御および漏水防止に関する基礎的研究, 材料, Vol.48, No.11, pp.1308-1351, 1999
- 7) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen : Water-entrained cement-based materials, II .Experimental observations, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.937-978, 2002.
- 8) Cusson, D., Mechtcherine, V. and Lura, P.: Practical Applications of Superabsorbent Polymers in Concrete and Other Building Materials, RILEM State of the Art Reports Volume 2, pp.137-148, 2012
- 9) 竹中寛, 末岡英二, 水谷征治, 安田正雪: 初期材齢における養生条件がコンクリートの品質に及ぼす影響, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 597-598, 2008
- 10) 小川善行, 早川光敬, 陣内浩, 山田直毅: エコセメントを用いたモルタルによるコンクリート用養生剤の効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.193-198, 2008
- 11) 笠井哲郎, 竹中寛, 安田正雪, 末岡英二: 生分解性吸水高分子ゲルを用いた養生効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1882-1887, 2012
- 12) 笠井哲郎, 中村悦子, Thiwanonth Thanakhom, 竹中寛: 生分解性吸水高分子ゲルを用いた内部養生効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1261-1266, 2015
- 13) Schrofl. C.Mechtcherinc. V. and Gorges. M. :Relation between the molccular structure and the efficiency of supcrabsorbent polymers(SAP) as concrete admixture to mitigatc autogenous shrinkage, Cement and Concrete Research, Vol.42,No.6,pp.865-873,2012.
- 14) コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, pp.51-54, 2002