

論文 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

笠井 哲郎^{*1}・中村悦子^{*2}・Thiwanonth Thanakhom^{*3}・竹中 寛^{*4}

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、生分解性吸水高分子ゲルを内部養生材として添加したモルタル・コンクリートに関し、その内部養生効果について検討を試みた。その結果、低水セメント比の条件では、適切な吸水倍率のゲルを用いることで、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、自己収縮ひずみが小さくなるなど、当該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：生分解性吸水高分子ゲル、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・長スパン化に伴い、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) 100N/mm²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の発生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、美観の低下など多くの悪影響につながるものである。この自己収縮を抑制・低減する方法として、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」などが規定されている。また、湿潤養生方法としては、水中、湛水、散水、湿布、湿砂、膜養生などが挙げられるが、構造物の規模や形態および環境条件等によっては、これらの湿潤養生の効果が十分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（以下、生分解性ゲルまたはゲルと称す）を塗膜養生剤として用い、初期材齢におけるコンクリートを湿潤状態に保つことで、表層近傍のコンクリートのひび割れの低減や圧縮強度の向上に効果を発揮すること等を示した¹¹⁾。

本研究では、コンクリートの練混ぜ水または間隙水

の乾燥を低減し、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、生分解性ゲルを添加して製造したコンクリートに関し、その内部養生効果について検討を試みた。この生分解性ゲルは、パルプを主原料とするカルボキシメチルセルロースと水を混合し、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するもので、放射線の照射時間を変えることで、吸水特性の異なるゲルが作製できる。そこで、吸水特性の異なる2種類の生分解性ゲルを用い、これを添加したモルタルまたはコンクリートに関し、強度発現性、自己収縮、乾燥収縮等の評価を行い、内部養生剤としての有効性について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、モルタル・コンクリートの水セメント比が40%の場合、普通ポルトランドセメントを、水セメント比が25%の場合、シリカフェウ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。使用した生分解性ゲルは、水道水の吸水倍率が乾燥状態から質量比で15倍程度(G1)と60倍程度(G2)の2種類を使用した。G1は使用時の含水率が大いため、フルイ等による粒度調整はできないが、15倍吸水時の直径は、1~3mm程度である。G2は、使用時の含水状態でフルイにより分級し、0.6mmフルイを通り0.3mmフルイに留まるものを用いた。また、この生分解性ゲルはブリーディング水を水道水と同程度に吸水することから¹²⁾、モルタル・コンクリート中においても、アルカリ性の水に対し吸水能を発揮するものと推察される。

2.2 モルタル・コンクリートの配合

モルタルの配合条件およびコンクリートの配合を表

*1 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科

*3 東海大学 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*4 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (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	
生分解性ゲルに吸水	W ₂	上水道	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度3.16 g/cm ³
		シリカフェュームプレミックスセメント	密度3.09 g/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	青梅産硬質砂岩砕砂	表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率0.62%, 最大寸法15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル
生分解性ゲル	G1	カルボキシメチルセルロース	吸水倍率15倍 (使用時の含水率71.3%)
	G2		吸水倍率60倍 (使用時の含水率15.3%)

表-2 モルタルの配合条件

W/C(%)	配合	S/C(%)	SP添加率(%)	ゲル添加率(C×%)
40	40-0	2.4	0.675	0
	40-G-1			0.05 (G1)
	40-G-2			0.05 (G2)
25	25-0	1.9	1.2	0
	25-G-1		1.3	0.05 (G1)

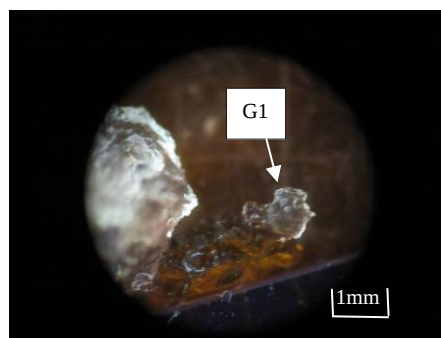


写真-1 15倍吸水ゲル(G1)

表-3 コンクリートの配合

配合No.	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SP (C×%)	G1 (C×%)
				C	W ₁	W ₂	S	G			
								5~10mm	10~15mm		
25-0	15	25	48.2	644	154	0	797	357	535	1	0
25-O-W					153	4.092				1.1	0.05
25-I-W					149						

* W₂はG1が吸水倍率15倍となる水量である。

ー2、表-3にそれぞれ示す。なお、ゲルは乾燥状態の添加率である。水セメント比40%においては、G1とG2のゲルを用い、その有効性の比較検討を行った。水セメント比25%においては、使用ゲルはG1のみを用いた。G1およびG2の添加は、それぞれ吸水倍率が乾燥状態から15倍および60倍となるよう加水・吸水させたものを使用した。写真-1に15倍吸水したG1を示す。

2.3 練混ぜおよび供試体の作製方法

モルタルの練混ぜは、ホバート型ミキサーを用い、ゲルの添加条件を変えて、図-1の方法にて行った。コンクリートの練混ぜは、パン強制練りミキサーを用い、図-2の方法で行った。生分解性ゲルの添加方法は、表-4に示すように、ゲルが吸水する水量(W₂)を添加前に吸水させて行う25-O-W(外割添加)と25-I-W(内割添加)、およびW₂とW₂を吸水させていないG1を別々に添加する25-O-Dの3種類の方法とした。なお、コンクリートの試験では、25-O-Dは行わなかった。また、W/C=40%にお

	低速	高速		高速	
C+W ₁ +SP	→	→	+S	→	+(G+W ₂)
	30秒	60秒	90秒		90秒
					排出

* Gは生分解性ゲル

図-1 モルタルの練混ぜ方法

C+S+G	→	+(W ₁ +SP)	→	+(G ₁ +W ₂)	→	排出
	15秒		90秒		90秒	

* G1は生分解性ゲル、Gは粗骨材

図-2 コンクリートの練混ぜ方法

表-4 ゲルの添加方法

配合名	ゲルの添加方法
25-0	—
25-O-W	G1に15倍吸水させた後、外割添加
25-O-D	G1と15倍分の水を別々に外割添加
25-I-W	G1に15倍吸水させた後、内割添加

けるゲルの添加方法は、全て内割とした。

2.4 試験項目および方法

モルタルおよびコンクリートについて行ったフレッ

表-5 試験項目・方法

試験項目	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（標準養生、1日封かん27日気中、3日封かん25日気中、7日封かん21日気中、28日封かん） 試験材齢7日（3日封かん4日気中）
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」に準拠し、測定長50mmの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日後アルミテープを剥がし行った
スランプ	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」
空気量	モルタルは質量法に準拠 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（空気室圧力方法）」
凝結時間	JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」

表-6 フレッシュモルタルの試験結果

配合名	フロー値	空気量 (%)	凝結(h:m)	
	(mm)		始発	終結
40-0	222×221	6.7	3:50	6:10
40-G1	167×168	6.5	4:00	6:35
40-G2	162×162	8.5	3:50	6:25

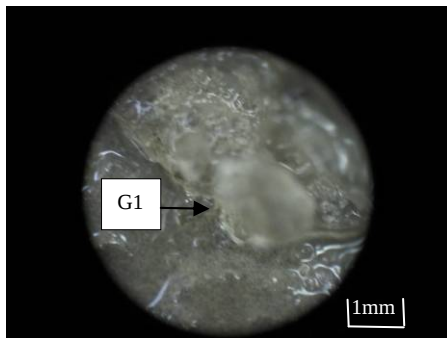


写真-2 25-0-W モルタル中の吸水ゲル(G1)

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）」¹³⁾の規定に準拠し、モルタル、コンクリートとも100×100×400mmの鋼製型枠を用い、測定長50mmの埋め込みゲージを用いて材齢28日まで測定を行った。また、測定の開始時期は各配合における凝結始発とした。乾燥収縮に関しては、自己収縮試験の供試体を脱型（アルミ箔粘着テープを剥がす）し、材齢29日以降、湿度60%の恒温室に静置し継続して長さ変化を測定することにより行った。同一条件の供試体を2体作製し、その平均値を収縮量とした。

3. 実験結果および考察

3.1 G1とG2を用いたモルタルの比較(W/C=40%)

G1とG2を用いたモルタルのフレッシュ性状を表-6に示す。表より、ゲルの添加による凝結時間への影響は小さいが、モルタルフローの低下が見られた。また、この低下は、G1よりG2の方が大きくなった。これは、G1ではモルタルの練混ぜ後、吸水したゲルは粒状を形成し分散しているが（写真-2参照）、G2ではG1の様

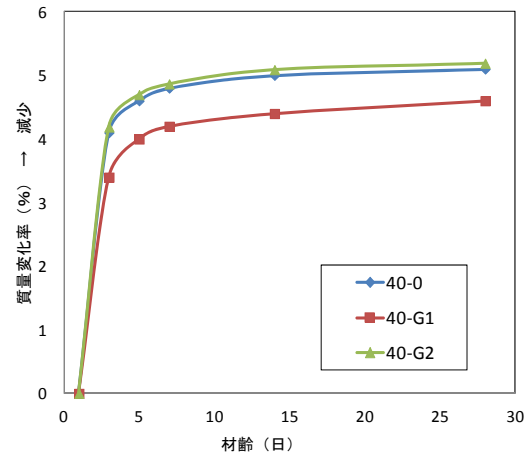


図-3 モルタルの質量変化率

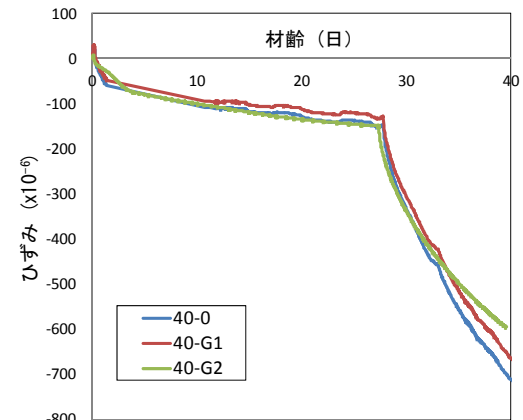


図-4 自己収縮と乾燥収縮(W/C=40% モルタル)

な粒状の形成を観察できず、練混ぜ中に非常に細かく全体に分散したために、フローの低下が大きくなったものと推察される。また、同様な理由により、G2は巻き込み空気が多くなる傾向となるため、空気量が他の配合より大きくなったものと考えられる。

図-3は、φ100×200mmの円柱供試体を材齢24時間で脱型し、その後温度20±2℃、湿度60±5%RHに静置した場合の、各供試体の質量変化率（質量損失）を示したものである。図より、G2の質量変化率はプレーンモルタル(40-0)とほぼ同様な値となり、ゲルによる保水効果が現れていない。一方、G1は他の配合のものより

初期材齢において質量変化率が小さく、ゲル内に水を抱え込んで乾燥を低減する効果（保水効果）が現れていることから、内部養生効果が期待できるものと考えられる。

図-4 は材齢 28 日までの自己収縮および 29 日以降の乾燥収縮の試験結果を示したものである。自己収縮に関しては、40-0 と 40-G2 はほぼ同等な値となっているが、40-G1 は収縮ひずみが僅かに小さくなっており、自己収縮の低減効果が見られた。しかし、材齢 35 日以降の乾燥収縮は、40-G2 より 40-G1 の方が大きくなる傾向を示しており、これについてはゲル添加の有無および種類の影響による細孔構造の中・長期材齢下の相違も含め今後検討する必要がある。

以上より、G1 において保水効果や自己収縮の低減効果が見られたことから、以下では G1 のみを用いてその内部養生効果に関する検討を行った。

3.2 G1 の内部養生効果 (W/C=25%)

(1) モルタル

表-7 に各種ゲルの添加方法におけるモルタルのフレッシュ性状を示す。なお、ゲルの添加により流動性が低下するため、ゲル添加の場合、SP の添加率を僅かに大きくした。表より、W/C=40%の場合と同様に凝結時間に及ぼすゲルの添加の影響は僅かであった。

図-5 は、W/C=40%の場合と同様な方法で測定した各供試体の質量変化率（質量損失）を示したものである。図-3 の W/C=40%に比べ、全ての条件で質量減少率は小さくなっている。これは、単位水量が少ないことおよび W/C が小さいため、組織が密で乾燥しにくいためであると考えられる。ゲルが吸水する分の水を外割で添加する 25-O-W および 25-O-D は、25-0 に比べ質量変化が大きい。これは、ゲルの吸水分を外割で添加するため、僅かに単位水量が多くなっていることが一因である。しかし、吸水する分を内割とする 25-I-W の質量変化率は 25-0 とほぼ同程度となっており、W/C=40%で生じた明確な保水効果は現れなかった。これは、前述したように低水セメント比の場合、組織が密で乾燥しにくいため、ゲルの保水効果が現れにくくなったためであると推察される。

図-6 は、各種養生条件における圧縮強度試験結果を示したものである。ゲルが吸水する分の水を外割で添加する 25-O-W および 25-O-D はプレーンモルタルである 25-0 に比べ、全ての養生条件において圧縮強度が小さくなっている。この強度低下はゲルの内部養生効果によるセメントの水和促進の要因よりも、外割で添加した水により W/C が大きくなること、および粒状を形成し分散したゲルが硬化後に欠陥部として残ることによる強度低下の要因の方が大きく現れたためと考えられる。一方、ゲルおよびゲルが吸水する分の水を内割で添加する 25-I-W は、20-0 と比べどの養生条件においても同等か僅

表-7 フレッシュモルタルの試験結果

配合名	フロー値	空気量 (%)	凝結 (h:m)	
	(mm)		始発	終結
25-0	175×172	8.0	2:35	5:05
25-O-W	201×199	8.6	2:25	5:10
25-O-D	214×211	8.8	2:25	5:10
25-I-W	180×176	8.0	2:30	5:10

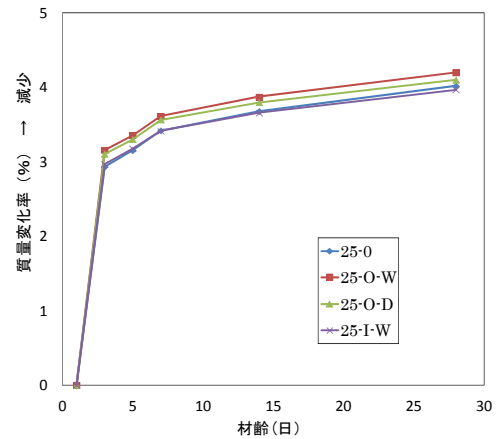


図-5 モルタルの質量変化率

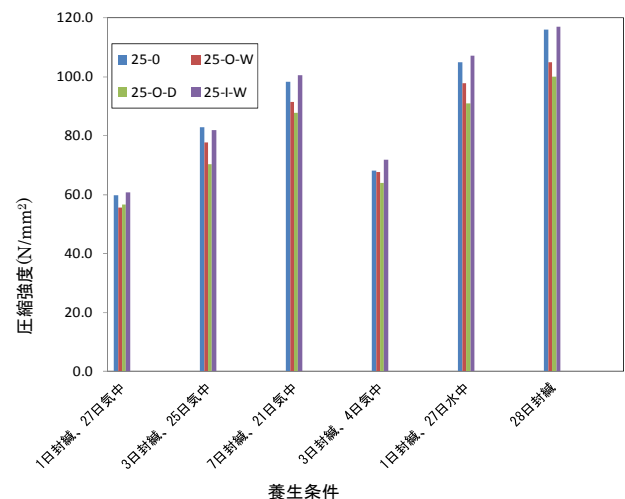


図-6 圧縮強度の試験結果 (W/C=25% モルタル)

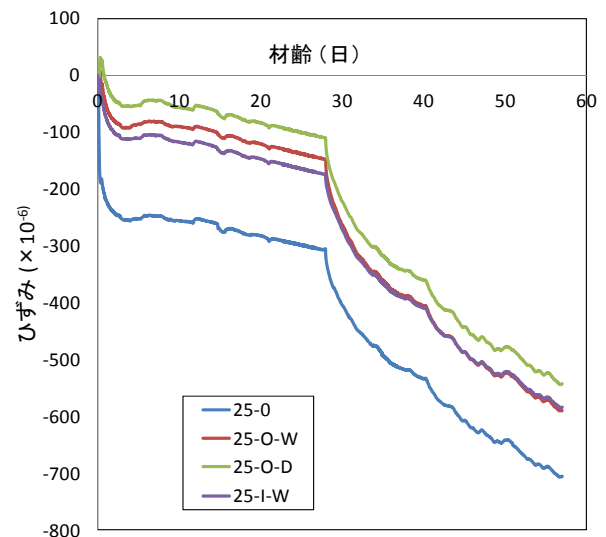


図-7 自己収縮と乾燥収縮 (W/C=25% モルタル)

かに圧縮強度が大きくなっている。G1 を添加すると前述した様に分散したゲルが硬化後に欠陥部となり強度低下の要因となるにも拘わらず、強度が大きくなったことは、G1 が内部養生材として作用し水和促進の効果が現れたためであると考えられる。

図-7 は材齢 28 日までの自己収縮および 29 日以降の乾燥収縮の試験結果を示したものである。G1 を添加したモルタルは全ての条件で、25-0 に比べ自己収縮が大幅に小さくなっている。25-O-W および 25-O-D は外割で添加した水により W/C が大きくなっていることが、自己収縮が小さくなる一要因と考えられるが、ゲルが吸水する分の水を内割で添加する 25-I-W の自己収縮も大幅に小さくなっており、ゲルの内部養生効果により自己収縮が低減されたものと考えられる。なお、この試験における 4 種類の供試体の作製は、90 分以内に行い計測を開始した。

(2) コンクリート

表-8 に各種ゲルの添加方法におけるコンクリートのフレッシュ性状を示す。コンクリートは、高流動コンクリートとし流動性は、スランプフロー値を測定した。空気量は、G1 の添加による影響は見られなかった。

図-8 は、図-3 と同様な方法で測定した各コンクリート供試体の質量変化率(質量損失)を示したものである。ゲルを添加した場合の方が僅かに質量変化率が小さくなり、ゲルの保水効果が認められる。

図-9 は、各種養生条件におけるコンクリートの圧縮強度試験結果を示したものである。モルタルの場合と同様に、ゲルが吸水する分の水を外割で添加する 25-O-W はゲルを添加しない 25-0 に比べ、圧縮強度が同等もしくは僅かに小さい。一方、ゲルおよびゲルが吸水する分の水を内割で添加する 25-I-W は、25-0 と比べどの養生条件においても同等か僅かに圧縮強度が大きくなっている。養生条件の影響としては、ゲルの添加の有無に拘わらず、封緘養生材齢が長いほど圧縮強度が大きくなっており、7 日封緘・21 日気中養生では、27 日水中養生と同程度の圧縮強度となった。

図-10 は、材齢 28 日までのコンクリートの自己収縮および 29 日以降の乾燥収縮の試験結果を示したものである。なお、測定の開始時期となる凝結始発は、ゲルの添加条件が同一のモルタルの値を用いた。図より、G1 を添加したコンクリートは、25-0 に比べ自己収縮が大幅に小さくなっている。また、ゲルが吸水する分の水を内割で添加する 25-I-W の自己収縮も大幅に小さくなっており、モルタルの場合と同様にコンクリートにおいても、ゲルの内部養生効果により自己収縮が低減されたものと考えられる。

表-8 フレッシュコンクリートの試験

配合名	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
25-0	470×440	3.2
25-O-W	530×520	3.2
25-I-W	500×480	3.3

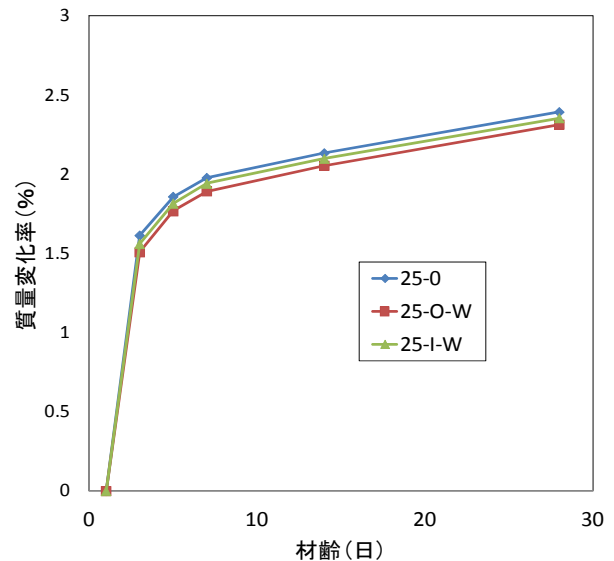


図-8 コンクリートの質量変化率 (W/C=25%)

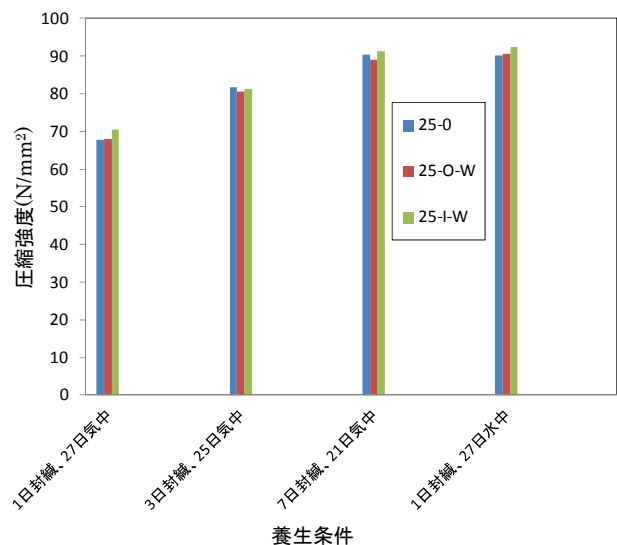


図-9 圧縮強度の試験結果 (W/C=25% コンクリート)

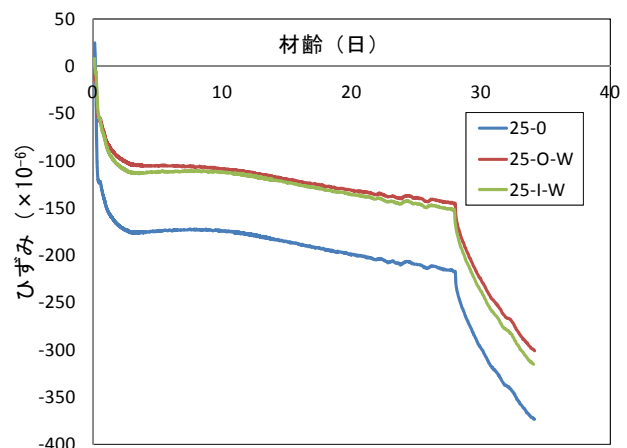


図-10 自己収縮と乾燥収縮 (W/C=25% コンクリート)

4. まとめ

生分解性吸水高分子ゲルを内部養生材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の低減効果について検討した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 生分解性ゲルの内部養生効果は、吸水倍率の大きい（60 倍）ゲルでは現れず、吸水倍率が小さく（15 倍）練混ぜ後も粒状を形成し分散するゲルにおいて、その効果が期待できる。
- (2) 生分解性ゲルを内部養生材として用いたモルタルおよびコンクリートの圧縮強度は、ゲルを添加しない場合に比べ、ゲルが吸水する分の水を外割で添加する場合は小さくなるが、ゲルが吸水する分の水を内割で添加する場合はほぼ同等の強度が得られた。
- (3) 生分解性ゲルを内部養生材として用いたモルタルおよびコンクリートの自己収縮は、ゲルを添加しない場合に比べ、ゲルの添加条件に拘わらず小さくなった。特に、低水セメント比においてゲルが吸水する分の水を内割で添加する条件でも自己収縮が大幅に小さくなった。

以上のことより、本研究の生分解性吸水高分子ゲルを用いることにより、十分な圧縮強度を確保しつつ、自己収縮を大幅に低減できることが判明した。

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, 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, 2012
- 12) Nadecho, T. and Tetsurou, K. : Effect of Biodegradable Water-Absorptive Polymer Gel on Concrete Curing at Early Ages, Proceedings of The School of Information Science and Technology, Tokai U., Vol.38, pp.15-24, 2013
- 13) 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