

論文 内部養生効果を指向した吸水高分子ゲルのプレキャストコンクリートへの適用に関する基礎研究

加茂 貴大*1・竹中 寛*2・笠井 哲郎*3

要旨：常圧蒸気養生されるプレキャストコンクリートの製造において、コンクリートに内部養生剤を添加することで、促進養生終了後における気中養生期間を湿潤状態に保ち、その品質を向上させることを目的に実験的検討を試みた。その結果、常圧蒸気養生されるコンクリートの場合でも、飽水状態の吸水高分子ゲルを添加することで、促進養生終了後のコンクリートの質量減少(乾燥)が小さくなり、圧縮強度も増加するなど、吸水高分子ゲルの内部養生剤としての有効性が明らかとなった。

キーワード：プレキャストコンクリート, 吸水高分子ゲル, 内部養生, 常圧蒸気養生, 圧縮強度, 質量変化

1. はじめに

現在のプレキャストコンクリート工場におけるプレキャスト部材の製造において、生産性の向上のために、促進養生として常圧蒸気養生がその殆どで採用されている。この常圧蒸気養生条件は、型枠にコンクリートを打設後、所定の前置時間を取った後、蒸気の通気により緩やかに温度を上げ、最高温度を一定時間保持して行われる^{1)~5)}。その後は気中養生(気中ストック)される。しかし、促進養生終了後、湿潤養生を行うと強度・耐久性の面でコンクリート製品の品質は向上する。このため、高耐久化を指向して促進養生終了後に水中養生が行われる場合もあるが、大掛かりな設備と費用が必要となる。

一方、高強度コンクリートの自己収縮を抑制・低減させる方法として、収縮低減剤や膨張材の使用とは別に、保水性粒子をコンクリート中に配置し、封緘または気中養生条件において、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^{6),7)}、再生骨材⁸⁾、廃瓦⁹⁾、および高吸水性ポリマー^{10)~13)}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。このための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^{14),15)}。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適用することを検討しており、コンクリートのプラスチック収縮や低水結合材比コンク

リートの自己収縮の低減と強度の向上など、その有効性を明らかにした^{16),~18)}。この吸水高分子ゲルは、カルボキシメチルセルロースを水と混合し、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。また、ゲルの吸水性能は照射する放射線の強度と時間により制御でき、吸水倍率が数倍のものから600倍程度のもので製造可能である。

本研究は、常圧蒸気養生されるプレキャストコンクリートの製造において、コンクリートに内部養生剤を添加することで、促進養生終了後における気中養生(以下、後養生と称す)期間に湿潤状態に保ち、その品質を向上させることを目的に行った。内部養生剤の有無および後養生の各種条件が蒸気養生したコンクリートの質量変化、圧縮強度および中性化深さ等に及ぼす影響について、実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。使用したゲルは、カルボキシメチルセルロースを主成分とするもので、常温での吸水倍率7.40倍(GC)のものである。なお、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。写真-1は、使用したゲル(GC)を水道水に分散させたものであり、シャーレにそれぞれ10gのゲルと50ccの水道水を加え、30秒間薬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は水中で高い分散性を示している。

コンクリートの配合を表-2に、モルタルの配合条件を表-3にそれぞれ示す。今回は、細孔径測定のためのモデル供試体の作成にはモルタルを用い、それ以外の試験ではコンクリートを用いた。ゲルの添加率は、単位セ

*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	
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/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	青梅産硬質砂岩碎石	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
	AEad	AE助剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
吸水高分子ゲル	GC	カルボキシメチルセルロース(CMC)	吸水倍率7.40倍(吸水率60.7%)

表-2 コンクリートの配合

配合名	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						ゲル添加量 (C×%)	
				C	W ₁	W ₂	S	G	SP		AEad
PL	20	40	42	425	170.00	0.00	708	1019	2.975	0.009	—
GC-0.05					169.16	0.84					0.05
GC-0.1					168.29	1.71					0.10

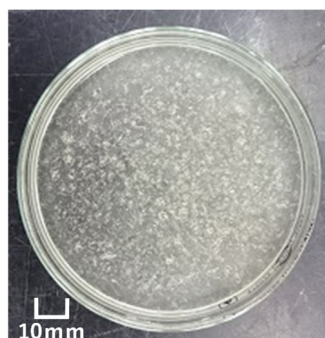


写真-1 GC

表-3 モルタルの配合条件

配合名	C	W/C (%)	S/C	ゲル添加率 (%)
PL	N	40	2.4	—
GC-0.1				0.1

	低速	中速	高速	中速	
C+W ₁ +SP	→	→	→	→	排出
	30s	60s	60s	30s	

図-1 モルタルの練混ぜ手順

	C+S+G	(W ₁ +SP)	(Gel+W ₂)	排出
	→	→	→	→
	15s	90s	30s	

図-2 コンクリートの練混ぜ手順

表-4 コンクリートの後養生条件

No.	記号	後養生条件	材齢
1	気中	→ → 気中 → →	後養生材齢 3, 7, 14d において 各種試験
2	1h水→気	→ 1h水中 →	
3	1d水→気	→ 1d水中 →	
4	3d水→気	→ 3d水中 →	
5	7d水→気	→ 7d水中 →	

メント量に対する絶乾状態時のゲルの質量百分率である。モルタルおよびコンクリートの場合とも、この添加率は文献(18)から内部養生効果が明確に表れた0.1(C×%)とし、中性化試験の場合のみ0.05(C×%)の場合も行った。

2.2 供試体の製造および養生条件

モルタルの練混ぜはホバート型ミキサを用いて行った。コンクリートではパン型強制ミキサ(100L)を用いた。吸水ゲルの添加は、ゲルに飽和水量分の水(W₂)を吸水させた後、練混ぜ終了の30秒前にミキサに投入した。また、ゲルに吸水させた水量分を練混ぜ水から差し引いた。モルタルおよびコンクリートの練混ぜ手順をそれぞれ図-1、図-2に示す。

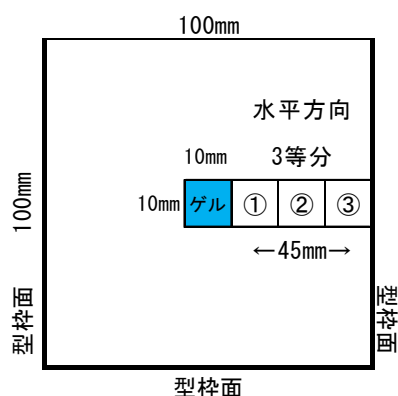
供試体寸法は、圧縮強度試験および質量変化率の試験ではφ100×200mmを、促進中性化試験では100×100×400mmとし、鋼製型枠を使用して作製した。常圧蒸気養生は恒温恒湿槽を用いて前置時間を3時間(室温20℃, 湿度65%), 昇温速度を20℃/h, 最高温度を65℃, 最高温度保持を3時間(室温65℃, 湿度98%), 降温速度を20℃/hとし、その後20℃(湿度65%)で保持し、材齢18時間で脱型した。脱型後直ちに脱型時の供試体質量と圧縮強度の測定を行った。

促進養生後の後養生の材齢は、上記の材齢18時間を基準(18時間を後養生の開始時間)とした。後養生条件は表-4に示すように、脱型後に試験材齢まで気中養生したものおよび脱型後に水中養生を1時間~7日施した後、試験材齢まで気中養生とした5条件である。

なお、この水中養生は20℃水中、気中養生は20℃, 湿度65%の条件である。

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における吸水倍率の値を飽和吸水倍率とした。
圧縮強度	JIS A1108「コンクリートの圧縮試験方法」に準拠。水セメント比は40%で行った。試験材齢は脱型後から3日、7日、14日の3条件で、常圧蒸気養生を行った後、気中、脱型後各1時間、1日、3日、7日水中のち気中の4条件で、各試験材齢まで後養生を行い圧縮試験を行った。
質量変化率	脱型時の質量を基準として、各種後養生を施した同一供試体の各材齢における質量を測定した。
促進中性化	JIS A1153「コンクリートの中性促進化試験方法」に準拠。水中養生、蒸気養生した供試体について実施した。蒸気養生供試体は脱型後8週間、20℃、60%の条件に静置した後実施した。
細孔径分布	ゲルを中心に配置した角柱供試体をダイヤモンドカッターで切断、供試体中心から3等分した各部分において水銀圧入法により細孔径を測定した。



【供試体断面】

図-3 モデル供試体の細孔径分布測定位置

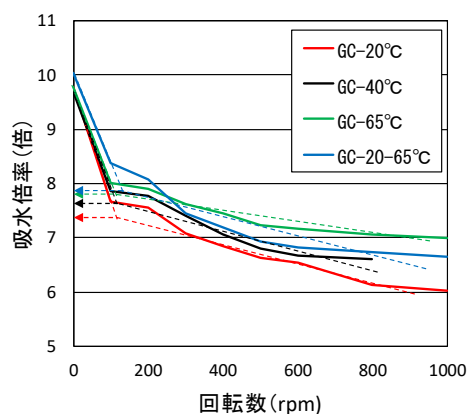


図-4 飽和吸水倍率の測定

2.3 試験項目および方法

試験項目を表-5に示す。ゲルの吸水特性の試験では、ゲル10gに20℃、40℃、65℃の3条件の水の水をそれぞれ190g加えて十分に吸水させ、遠心分離機を用いた方法¹⁸⁾により飽和吸水倍率を測定した。また、20℃から最高温度65℃の条件で養生されることを想定し、20℃の水で吸水させたゲルに前述した常圧蒸気養生と同一の温度履歴を与えた後、吸水倍率を計測する条件でも行った。また、質量変化率は、次式にて算出した。

$$\text{質量変化率(\%)} = \frac{\text{促進養生後の質量} - \text{各材齢時の質量}}{\text{促進養生後の質量}} \times 100$$

2.4 モデル供試体による細孔構造の評価試験

本試験は、本研究に用いた吸水ゲルの内部養生効果が常圧蒸気養生を行った場合でも発揮されるかを評価するために行った。まず、図-3に示すように、1辺が100mmの立方体の中心に寸法10×10×10mmの飽和水量分の水を吸水させたゲルを配置したモルタル供試体を作成した。これを前述の常圧蒸気養生条件で養生し、後養生を気中とし材齢7日に図に示す①～③の位置で約10×10×10mmのモルタル試料をダイヤモンドカッターで切り出し、各位置の試料の細孔径分布を求めた。細孔径分布の測定は、ポロシメータを使用し、水銀圧入法にて行った。

なお、試料は2日間アセトンに浸漬させた後、7日間真空乾燥させた。

3. 実験結果および考察

3.1 ゲルの吸水特性

図-4は、各水温におけるゲルの吸水倍率の測定結果を示したものである。図において、矢印と縦軸の交点が各条件の場合の飽和吸水倍率である。図より、水温が20℃、40℃および65℃の場合の飽和吸水倍率は、順に7.4倍、7.6倍および7.8倍であり、ゲルに吸水させた水温が高くなるほど吸水倍率は若干高くなる傾向にあったが、大きな差は生じていない。また、20℃から65℃の温度履歴を与えた条件(20→65℃)では、7.9倍と20℃の場合より僅かに大きくなった。以上の結果から、本研究のゲルは温度変化の影響を受けにくく、常圧蒸気養生を行った場合も、常温時と同様な吸水特性を示すものと考えられる。

3.2 質量変化率

図-5は、促進養生後から各種後養生した供試体の質量変化を示したものである。後養生が気中の場合(図(a))では、ゲル添加の有無に拘わらず材齢と共に質量が減少し乾燥が進行するが、どの材齢においてもゲルを添加したものが、質量減少率は小さくなった。この傾向は、後養生が1h水中後気中(図(b))および1d水中後気中(図

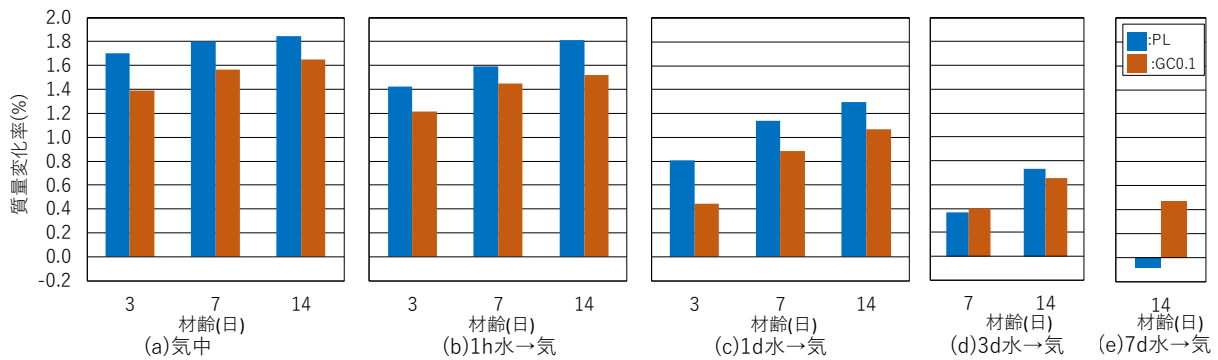


図-5 質量変化率

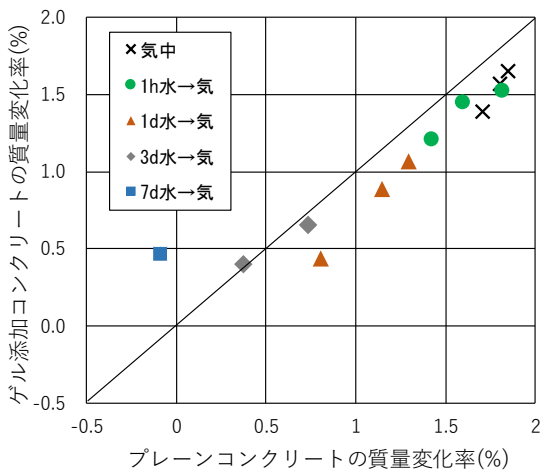


図-6 PL と GC-0.1 の質量変化率の相関

(c)の場合も同様となっている。また、後養生の水中養生期間が長いほど質量変化率が小さくなっている。これは水中養生期間が長いほどコンクリートへの吸水量が多くなり、その後の気中養生期間に乾燥が進行しても促進養生直後との質量差が小さくなったためであると考えられる。この傾向は、水中養生期間が3d(図(d))および7d(図(e))では、より顕著となっている。図-6は前述の図の全てのデータを用いて、ゲルを添加した場合としない場合の質量変化率の関係を示したものである。図より、水中養生期間が3dの材齢7日および水中養生期間が7dの場合を除き、ゲルを添加した場合の方が後養生条件に拘わらず、質量変化率が小さくなっていることがわかる。これらのことから、ゲルを添加することで、常圧蒸気養生終了後の供試体内部の保水性を向上させることができるものと考えられる。

3.3 圧縮強度特性

図-7は、プレーンコンクリート(図中のPL)とゲルを0.1(C×%)添加したコンクリート(図中のGC-0.1)に関し、促進養生終了後からの各種後養生条件における各材齢のコンクリートの圧縮強度の結果を示したものである。図より、PLとGC-0.1に関し同一後養生条件で比較すると、

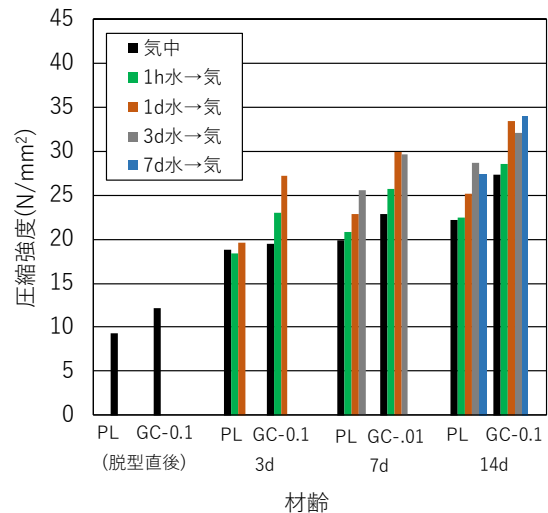


図-7 圧縮強度

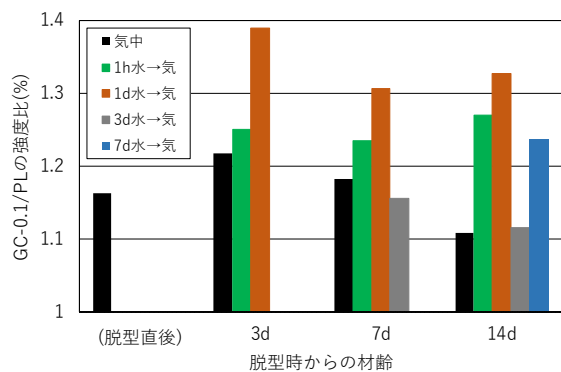


図-8 圧縮強度比

脱型直後も含め14日までの全ての材齢において、ゲルを添加したコンクリートであるGC-0.1の方が1~3割程度圧縮強度が大きくなった。これは3.2で述べたように、各後養生においてゲルの添加により供試体内部の保水性が向上し、セメントの水和が促進されたためであると推察される。また、一般に後養生における水中養生期間が長いほど、水和が促進され圧縮強度は大きくなると考えられるが、本結果からはその逆の傾向も見られた。一方、

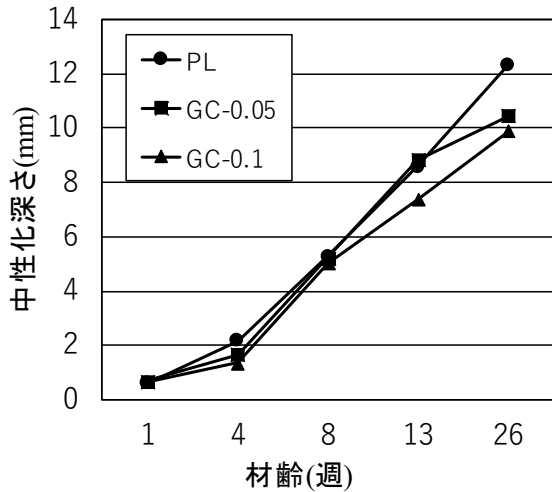


図-9 促進中性化試験結果

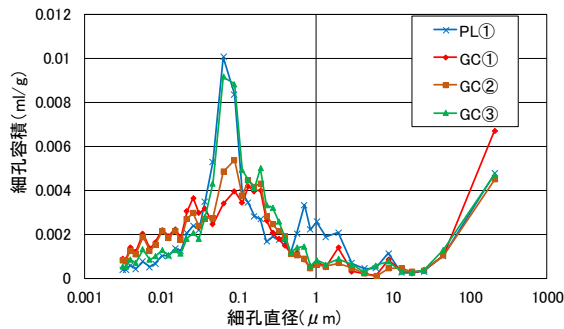


図-10 細孔径分布

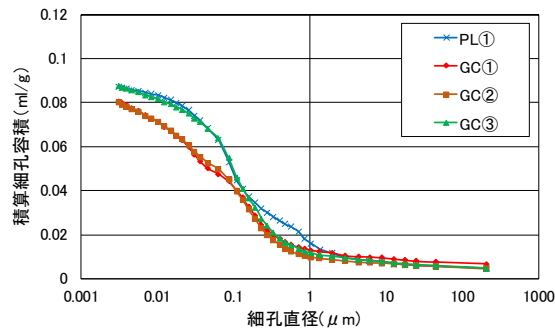


図-11 細孔径分布(積算)

製造工程の省力化の観点から、後養生の水中養生期間は短い方が望ましいと考えられる。図-8 は前図の結果から、同一後条件における PL と GC-0.1 の圧縮強度の比 (GC-0.1/PL) を示したものである。この値(比)は、ゲル添加による強度の増加率を示すものである。図より、後養生初期の水中養生期間の相違により、GC-0.1/PL の値は異なり、水中養生期間が 3 日または 7 日の場合より、1 時間または 1 日の方が大きくなった。また、後養生を気中養生とした場合で試験材齢 14 日において、1 割程度の強度増進が見られた。このことは、ゲル添加による強度促進効果を指向した場合、コンクリートの常圧蒸気養生

後の後養生における水中養生期間は、ゲルを添加しない場合に比べて縮小できる可能性が示唆された。

3.4 コンクリートの促進中性化試験結果

図-9 は、PL、GC-0.05 および GC-0.1 のコンクリートの促進中性化試験の結果を示したものである。なお、これらのコンクリートは、促進養生後気中養生したものである。ゲルの添加率が 0.05(C×%) の GC-0.05 と PL の中性化深さはほぼ同程度であるが、GC-0.1 では試験材齢が長くなるほど PL より中性化深さは小さくなっている。これは前述の強度増加の結果からも推察されるが、ゲルの添加により PL の場合より水和が進行し、組織がより緻密になったためであると考えられる。

3.5 モデル供試体による内部養生効果の評価

図-10 は、図-3 に示した中央のゲルから①～③の位置のモルタル試料(GC①～GC③)の細孔径分布を示したものである。なお、PL①は図-3 の中央にゲルのないプレーンモルタルの①の位置の試料の結果である。また、図-11 は、図-10 の結果から細孔径と積算細孔容積の関係として示したものである。図-10 より、中央のゲルにより近い GC①と GC②の場合、ゲルから遠い位置の GC③および PL①の場合より細孔径 0.1 μm 近傍の細孔量が少なく、細孔径 0.01 μm 近傍の細孔量が多くなっている。また、図-11 より、GC①と GC②の場合よりゲル GC③および PL①の場合の方が、積算細孔容積が大きくなっている。これらの結果は、常圧蒸気養生を行った場合でもゲル近傍の硬化体組織がより緻密になったことを示すものである。これは本研究で用いた吸水高分子ゲルの内部養生効果により、セメントの水和が促進されたためであると推察される。

4.まとめ

常圧蒸気養生されるプレキャストコンクリートに吸水高分子ゲルを内部養生剤として用いた場合について検討した結果、本研究の範囲内で次の事項が明らかとなった。

- (1) 本研究で使用した吸水高分子ゲルは、温度変化の影響を受けにくく常圧蒸気養生を行った場合も、常温時とほぼ同様な吸水特性を示した。
- (2) 吸水高分子ゲルを添加したコンクリートは、常圧蒸気養生後の後養生を 1 時間および 1 日とする条件では、質量変化率が小さくなり、常圧蒸気養生終了後の供試体内部の保水性を向上させることができるものと考えられる。
- (3) 脱型直後も含め 14 日までの全ての材齢において、ゲルを添加したコンクリートはプレーンコンクリートに比べ、1～3 割程度圧縮強度が大きくなった。
- (4) ゲルを添加したコンクリートは、後養生初期の水中

養生期間が3日または7日の場合より、1時間または1日の方がプレーンコンクリートに対する圧縮強度の増加率が大きくなった。このことより、ゲル添加による強度促進効果を指向した場合、コンクリートの常圧蒸気養生後の後養生における水中養生期間は、ゲルを添加しない場合に比べて縮小できる可能性が示唆された。

- (5) 吸水ゲルを0.1(C×%)添加したコンクリートの促進中性化深さは、プレーンコンクリートの場合より小さくなった。
- (6) モデル供試体の試験結果から、内部養生剤として配置した吸水ゲルに近い位置の硬化体の方が近い位置またはゲルの添加がない硬化体より、組織がより緻密となり、本研究の条件においても、内部養生効果が現れたものと推察される。

参考文献

- 1) 新田智博ほか：蒸気養生を行った加圧成形コンクリートの強度性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.637-642, 1997
- 2) 田所龍雄，松崎勇仁，友竹博一：コンクリート製品の生産性向上に関する実験的研究，土木学会第65回年次学術講演会，pp.1349-1350, 2010
- 3) 笠井哲郎，田澤榮一，磯貝寛幸：常圧蒸気養生で製造するコンクリート製品へのダブルミキシングの適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.2185-2190, 2009
- 4) 鈴木翔太ほか：ダブルミキシングで製造したプレキャストコンクリートの耐凍害性と細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.2, pp.355-360, 2014
- 5) 鈴木翔太ほか：プレキャストコンクリートの耐凍害性向上へのダブルミキシングの有効性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.2, pp.433-438, 2015
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen : Water-entrained cement-based materials, II . Experimental observations, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.937-978, 2002.
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 徳良介，竹中寛，笠井哲郎：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.397-402, 2017