

論文 吸水高分子ゲルを内部養生剤として添加したプレキャストコンクリートの耐久性

中西 成明*1・竹中 寛*2・松村 仁夫*3・笠井 哲郎*4

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、コンクリートに吸水高分子ゲルを内部養生剤として添加することで、促進養生終了後の気中養生期間に内部養生効果により湿潤状態が保たれ、圧縮強度が2割程度向上する。しかし、硬化後に内部に残存する内部養生剤がコンクリートの耐久性に影響することが懸念されるため、凍結融解抵抗性および水密性およびについて検討した。その結果、常圧蒸気養生されるコンクリートにおいて、吸水高分子ゲルの内部養生剤としての添加は耐久性に殆ど影響しないことが判明した。

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、耐凍害性、水密性

1. はじめに

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等が規定されている。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^{1),2)}。また、プレキャストコンクリート製品の製造においては、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、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^{3)~7)}、その後は気中養生(気中ストック)される場合が多い。しかし、促進養生終了後、湿潤養生を行うと強度・耐久性の面でその品質は向上する。このため、プレキャストコンクリート製品の品質向上においても、促進養生終了後に湿潤状態を保つことは重要となる⁸⁾。

著者らはこれまで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および内部養生剤として適用することを検討してきており、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^{9)~11)}。さらに、この内部養生剤をプレキャストコンクリートに添加することで、促進養生終了後における気中養生(以下、後養生と称す)期間にコンクリート内部が

無添加のものより湿潤状態に保たれ、その品質のうち圧縮強度が2割程度および中性化抵抗性等も向上することを示した。また、この品質向上は、気中養生期間にゲル近傍の水和が促進され組織がより密実になっていることによることも報告した⁸⁾。しかし、文献¹⁰⁾で指摘されているように、当該ゲルによる内部養生の効果はセメントの水和が促進され強度発現が向上する一方で、粒状を形成し分散したゲルが硬化後にコンクリート内部に残存し、欠陥部(空隙)を形成することが考えられる。この空隙はコンクリートの凍結融解抵抗性やコンクリート内部の物質移動等に起因する耐久性に影響することが懸念される。

そこで本研究は、常圧蒸気養生されるプレキャストコンクリートを対象として、吸水高分子ゲルを内部養生剤として添加したコンクリートの耐久性について検討した。検討内容は前報⁸⁾の結果の再現性評価も含め、内部養生剤の有無および後養生の条件が蒸気養生したコンクリートの圧縮強度、凍結融解抵抗性および水密性に及ぼす影響について実験的検討を行った。

なお、内部養生とは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て乾燥の低減や強度発現性の向上(以下、内部養生効果と称す)を指向したものである。内部養生材としてはこれまでに軽量骨材^{12),13)}、再生骨材¹⁴⁾、廃瓦¹⁵⁾、および高吸水性ポリマー^{16)~19)}など吸水性の高い材料の使用が検討されている。

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、パルプを

*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 博士(工学) (正会員)

*3 足利大学 工学部 創生工学科 建築・土木分野 助教 (正会員)

*4 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	G _{max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							ゲル添加率 (C×%)	Air(%) の実測値		
					C	W ₁	W ₂	S	G					SP	AE助剤
									1005	1510	2015				
PL	20	40	4.5±1	42	425	170.00	0.00	708	203.8	611.4	203.8	2.975	0.009	—	4.4
GC-0.1						168.29	1.71							0.1	4.2

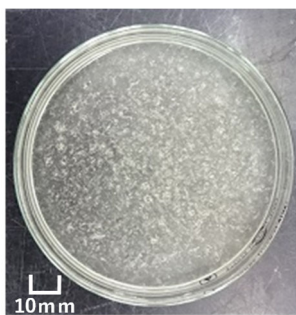
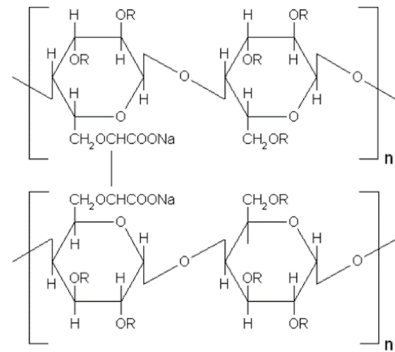


写真-1 吸水後の高分子ゲル(GC)



R=H or CH₂COONa

図-1 使用ゲルの化学構造式

PL	(C+S+G) → (W ₁ +SP) → 排出
	15s 120s
GC-0.1	(C+S+G) → (W ₁ +SP) → (Gel+V ₁) → 排出
	15s 90s 30s

*表の数値は練混ぜ時間(秒)である。

図-2 コンクリートの練混ぜ手順

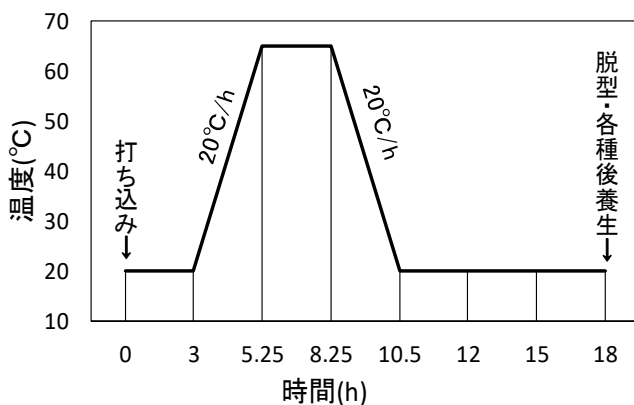


図-3 促進養生条件

表-3 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 1, 3, 7, 14day において各種試験
2	1h水→気	→1hour水中→	
3	1d水→気	→1day水中→	

主原料とするカルボキシメチルセルロースナトリウム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(吸水倍率, 膨潤率)の異なる架橋カルボキシメチルセルロースナトリウムが作製できる。図-1に架橋カルボキシメチルセルロースナトリウムの化学構造式を示す。また、パルプが原料であるため、生分解性であり環境への負荷は小さい。本研究で使用したゲル(以下、GCと称す)の吸水倍率(膨潤率(%))⁸⁾は、水温が20°C, 40°Cおよび65°C(促進養生における最高温度)において、順に7.4(倍)(740(質量%)), 7.6(倍)(760(質量%))および7.8(倍)(780(質量%))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るが、大きな差は生じていない。この吸水倍率は絶乾状態からの水道水の吸水量から質量比で算出した値である。また、文献11)に本ゲルの吸水特性(吸水倍率)は、水酸化カルシウム飽和溶液中であっても水道水の場合と同等であることが指摘されている。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秒間葉さじで拡散させた後5分間静置した状態で

表-4 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(18時間)、3日、7日、14日の4条件で、常圧蒸気養生後の後養生は、気中、脱型後各1時間、1日水中のち気中の3条件とした。
凍結融解試験	JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A法)」に準拠して行った。試験開始までの供試体の養生条件は、促進養生終了後に脱型し、後養生終了後材齢24日まで気中養生した後、28日まで水中養生(20℃)し、試験に供した。
透水試験	「コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計」*のインプット法に準拠して試験を行い、供試体に浸透した水の平均浸透深さから初期拡散係数を求めた。供試体は、圧縮強度と同様の後養生を行ったφ100×200mmのコンクリートを、材齢28日経過以降に50mmの厚みで切断して作製し、1ケースあたり3体とした。なお、試験時の水圧は0.5MPaとした。

*村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計，技報堂出版，2002。

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に示す。目標空気量を4.5±1(%)とし、この範囲になるようにAE助剤で調整した。表には各コンクリートの空気量の実測値も示した。また、空気量試験時に得られたフレッシュコンクリートの単位容積質量は、PLおよびGC-0.1でそれぞれ2320(kg/m³)および2321(kg/m³)である。ゲルの添加率は、単位セメント量に対する絶乾状態時のゲルの質量百分率であり、添加率は文献(8)、(11)から内部養生効果が明確に表れた0.1(C×%)とした。

2.2 供試体の製造および養生条件

コンクリートの練混ぜは、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。コンクリートの練混ぜ手順を図-2に示す。

供試体寸法は、圧縮強度試験ではφ100×200mmおよび凍結融解試験では100×100×400mmとした。透水試験用の供試体は、φ100×200mmの供試体を所定の厚さにダイヤモンドカッターで切断して作成した。



写真-2 透水性試験装置

常圧蒸気養生は図-3に示すように、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時間基準(18時間を後養生の開始時間)とした。後養生条件は表-3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時間および1日施した後、試験材齢まで気中養生とした3条件である。

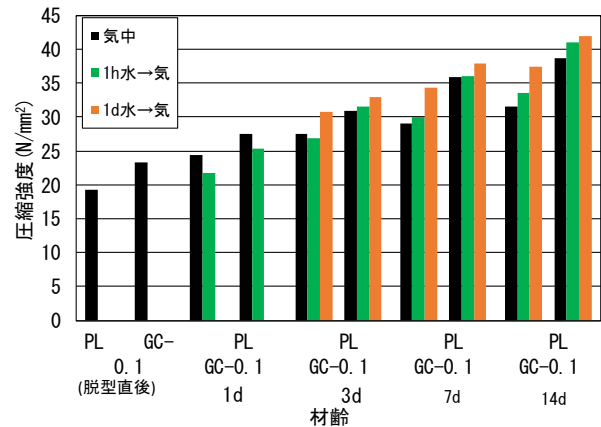


図-4 圧縮強度

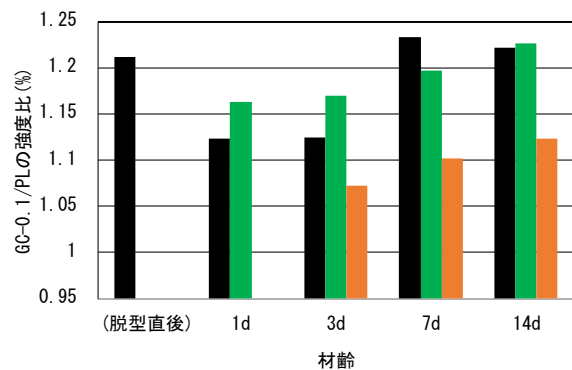


図-5 圧縮強度比

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。

2.3 試験項目および方法

表-4 に試験項目とその試験方法を示す。ゲルの吸水特性の試験では、ゲル 10 g に 20℃の水を 190 g 加えて十分に吸水させ、遠心分離機を用い徳らが行った方法¹¹⁾により飽和吸水倍率を測定した。

また、本実験で使用した透水試験装置を写真-2 に示す。

3.実験結果および考察

3.1 圧縮強度特性

図-4 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試験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、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 の全ての条件で圧縮強度が大きくなっている。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、材齢 1 日または 3 日ではその逆の傾向も見られた。前述したように本圧縮強度試験は、前報の再現性評価を目的に行ったものであるが、これは前報とはほぼ同等の結果となった。また、ゲル添加による強度発現性の向上に関しては、前報で示したように、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、無添加のものに比べセメントの水和が促進されたためであると推察される。

図-5 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、材齢 3 日以降では水中養生期間が 1 日の場合より、1 時間または気中の方が大きくなり、ゲル添加による強度増加(内部養生効果)が明確に現れている。また、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。後養生を気中養生とした場合でも試験材齢 14 日において、1 割程度の強度増進が見られた。以上の結果は、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の水中養生期間をプレーンコンクリートの場合に比べて縮小できることを示唆している。

3.2 凍結融解抵抗性

図-6, 7 はプレーンコンクリートで後養生を気中 (PL 気中) と 1 日水中 (PL1d 水) および、ゲル添加コンクリートで後養生を気中 (GC 気中) と 1 日水中 (GC1d 水)

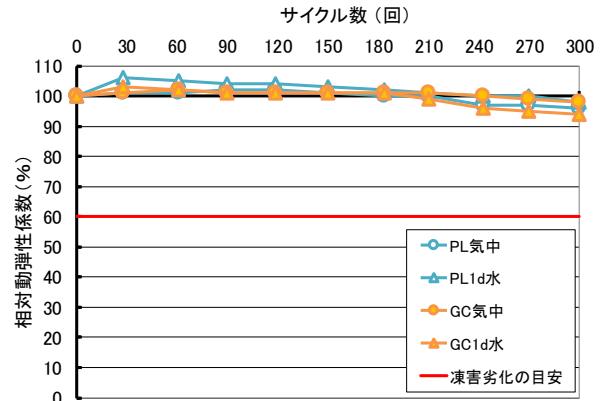


図-6 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化

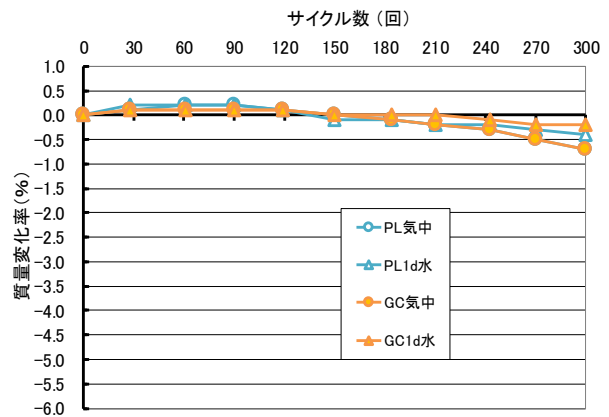
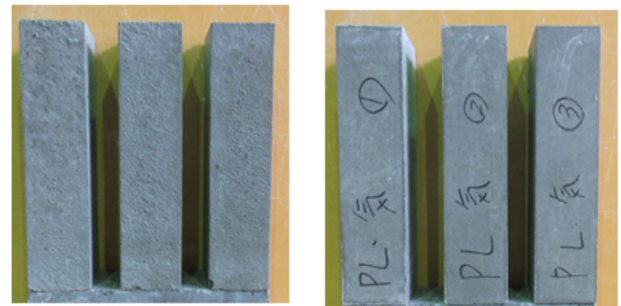
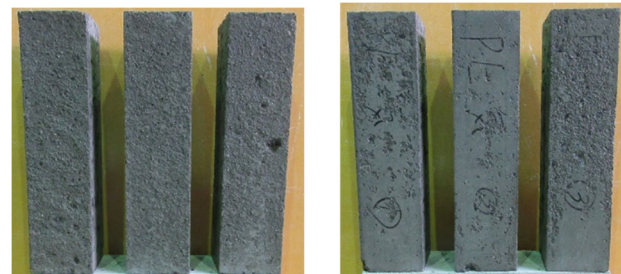


図-7 凍結融解サイクルに伴う質量減少率の変化



(a) PL 気中 (左: 打込み面, 右: 記号面 0 サイクル)



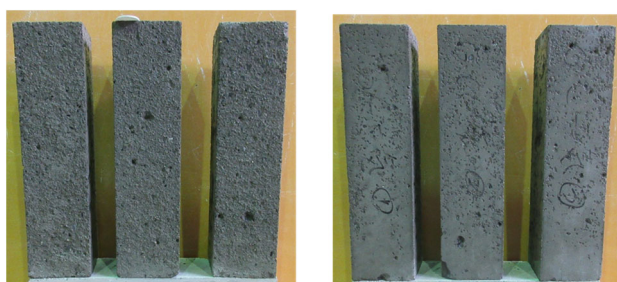
(b) PL 気中 (左: 打込み面, 右: 側面 300 サイクル)

写真-3 凍結融解試験用供試体 (PL)

とした供試体の凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化および質量減少率の変化を示したものである。図-6 より、210 サイクル以降で僅かに相対動弾性係数の低下が見られるが、ゲル添加の有無および後養生条件



(a) GC 気中 (左:打込み面, 右:側面 0 サイクル)



(b) GC 気中 (左:打込み面, 右:側面 300 サイクル)

写真-4 凍結融解試験用供試体 (GC)

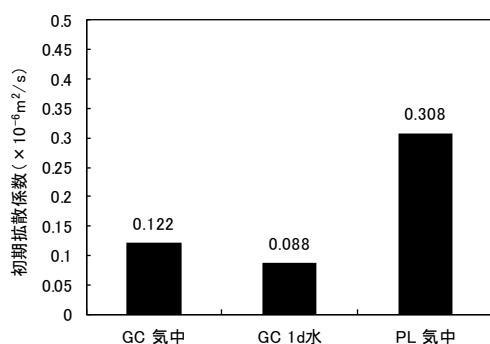


図-8 透水試験結果

の相違に拘わらず、凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の低下は殆ど生じていない。また、図-7より、質量変化率に関しても相対動弾性係数と同様に、180~210サイクル以降で質量減少が見られるが、ゲル添加の有無および後養生条件による差異は現れていない。

写真-3, 4に、PL 気中と GC 気中に関し、凍結融解試験における開始材齢 (0 サイクル) と 300 サイクル後の供試体の写真を示す。これより、表層部の気泡部分の劣化が僅かに進行していることが観察できるが、ゲル添加の有無による劣化進行の差異は見られない。

以上、前述したように硬化後にコンクリート内部に残存するゲルが耐凍害性を低下させることが懸念されたが、本結果からその影響は殆どなく、プレーンの場合と同等の凍結融解抵抗性を示すことが判明した。

また、本試験における開始材齢時に測定した一次共鳴振動数、供試体質量および寸法等から算出した動弾性係数の平均値は、PL 気中、PL1d 水、GC 気中、GC1d 水の順に、2.86、2.82、3.23、3.44 ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$) となり、ゲル

添加の方が無添加の場合より動弾性係数が 1~2 割程度大きい結果となった。この結果は、3.1 で述べたと同様にゲル添加による強度発現性の向上を示すものである。更に、上記と同様に試験開始材齢時の単位容積質量の平均値を比較すると、PL 気中、PL1d 水、GC 気中、GC1d 水の順に、2194、2190、2279、2310 (kg/m^3) となり、後養生が「気中」、「1d 水」のいずれもゲルを添加したコンクリートは単位容積質量が大きくなった。これは、前報でも述べたようにゲル添加により後養生後のコンクリートの保水性が向上し、PL に比べセメントの水和が進行し化学結合水量が多くなったこと、および試験開始材齢時のコンクリートの含水率が大きいことに起因するものと推察される。

3.3 透水性 (水密性)

図-8 は GC 気中、GC1d 水および PL 気中の条件としたコンクリートに関する透水試験結果から算出した初期拡散係数を示したものである。図より後養生が同一の GC 気中と PL 気中を比較すると、ゲルを添加した GC 気中の方がプレーンの 4 割程度初期拡散係数が小さい結果となった。これは、当初懸念した硬化後のコンクリート中に残存するゲルにより透水係数が増加すると考えられる影響よりも、ゲルの内部養生効果によりセメントの水和が促進され組織がより密実になった影響の方が大きく現れたためであると推察される。また、後養生条件が異なる GC 気中と GC1d 水を比較すると、GC 水中の方が更に初期拡散係数が小さくなっている。これは、3.1 の圧縮試験結果で述べたように、後養生を 1 日水中とした場合の方が気中養生の場合より圧縮強度が大きく、より組織が密実になったためと考えられる。

以上のことより、ゲルを添加したコンクリートは硬化後に内部に残存するゲルの影響は小さく、内部養生効果により組織が密実になり透水係数が小さくなり水密性は向上することが判明した。

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を対象として、吸水高分子ゲルを内部養生剤として添加したコンクリートの耐久性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) 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 割程度圧縮強度が大きくなり、前報と同様な結果となった。また、動弾性係数もゲル添加の方が無添加の場合より 1~2 割程度大きい結果となった。
- (2) 硬化後にコンクリート内部に残存するゲルが耐凍害性を低下させることが懸念されたが、ゲル添加の

有無および後養生条件の相違に拘わらず、凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の低下および供試体の質量減少は小さく、プレーンの場合と同等の凍結融解抵抗性を示す。

- (3) ゲルを添加したコンクリートは硬化後に内部に残存するゲルの影響は小さく、内部養生効果により組織が密実になり透水係数が小さくなり水密性は向上する。

謝辞：本研究の実施に当たっては、東海大学大学院修士生であった加茂貴大氏のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 加茂貴大, 竹中寛, 笠井哲郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.547-552, 2019
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 横田光一郎, 五十嵐一心: 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
- 17) 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
- 18) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen: Water-entrained cement-based materials, II. Experimental observations, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.937-978, 2002.
- 19) 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