

論文 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

笠井 哲郎*1・竹中 寛*2・安田 正雪*3・末岡 英二*4

要旨: 打込み直後の極初期材齢のコンクリートが急激な乾燥を受けた場合、表層部の品質低下が懸念される。本研究では、ブリーディング水が停止した以降の極初期材齢において、コンクリート表面を乱すことなく表層部の湿潤状態を保つことができる、生分解性吸水高分子ゲルを用いた養生の効果について検討を行った。その結果、コンクリートの表層部の組織が緻密化され、圧縮強度が増加し、透気係数や収縮ひずみが小さくなるなど、当該養生方法の有効性を明らかにした。

キーワード: 生分解性吸水高分子ゲル, 初期養生, 水分損失, 透気係数, 収縮ひずみ

1. はじめに

打込み面積が大きい床のような部材では、コンクリートの打込み後の極初期材齢において表層部の乾燥を防ぐことが困難であるため、コンクリートの表層部分が急激な乾燥を受けて、いわゆるプラスチック収縮に起因する表面ひび割れが発生しやすくなるほか、養生水の不足により強度や水密性などの品質の低下が懸念される。プラスチック収縮のメカニズムについては、ブリーディング水の上昇速度と比較して、表面からの水の蒸発速度が速い場合、ブリーディング水面が固体粒子層以下となることにより、コンクリート中の間隙水にメナスカスが形成され、負圧が生じるために収縮が起こると説明されている^{1) 2) 3)}。このため、表層部の乾燥を防ぐ目的で一般にマット養生などが施されるが、コンクリートの打込み後の極初期材齢におけるマットの敷設や灌水養生は表面を乱すために仕上がり精度の観点などからは難しい。通常は硬化後(材齢1日程度)からマット敷設・湿潤マット養生が施されるため、コンクリートの打込み後から湿潤マット養生開始までの間は乾燥状態で養生不足となり、表面ひび割れや品質低下が助長される可能性がある。この対策として、従来より被膜養生剤等による膜養生が多く用いられているが、水分逸散が十分抑制されておら

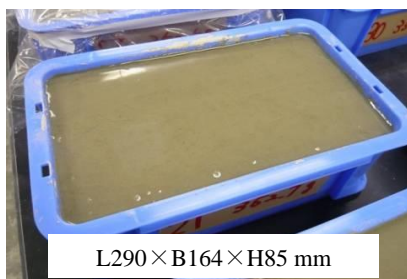
ず、品質確保の観点から十分であるとは言い難い^{4) 5)}。

本研究は、打込み直後からの極初期材齢におけるより効果的な養生方法を確立すべく、生分解性吸水高分子ゲル(以下、生分解性ゲルと称す)を用いた養生の効果について検討を行ったものである。生分解性ゲルは、吸水性能が高いため、ある一定期間コンクリート表層部の湿潤状態を保つ効果が期待され、極初期材齢からの生分解性ゲル養生と、湿潤マット養生などを組み合わせることにより、硬化初期の乾燥に伴う表面ひび割れの発生抑制や表層部の高品質化が期待できる。そこで、生分解性ゲルを用いた養生方法に関し、使用時のゲル保水率(完全膨潤時の吸水量に対する添加水量)や使用時期(散布時期)などを変化させた場合について、コンクリートの表層部の強度、収縮および組織の緻密性などに及ぼす影響について実験的検討を行った。また比較として、市販のパラフィン系の被膜養生剤の使用や灌水養生についても検討した。

2. 実験概要

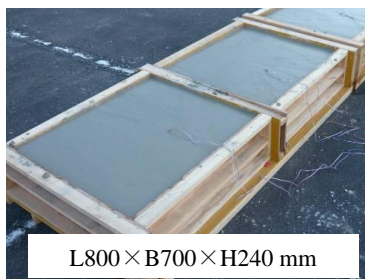
2.1 供試体および養生条件

使用したコンクリート供試体は、写真-1に示す3種類(Model I, Model II, Model III)の寸法のもので、



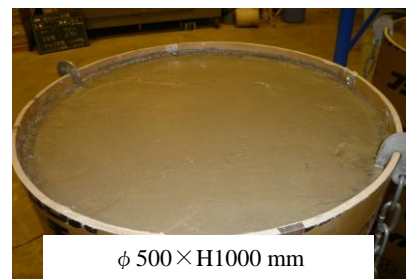
L290×B164×H85 mm

a) Model I



L800×B700×H240 mm

b) Model II



φ 500×H1000 mm

c) Model III

写真-1 試験体

*1 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*2 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 東洋建設(株) 美浦研究所 材料研究室長 (正会員)

*4 東洋建設(株) 美浦研究所 所長 博(工) (正会員)

型枠の材質は順にポリエチレン製、木製および硬質紙製である。これらの型枠にそれぞれコンクリートを打設し、表面仕上げを行った後、表-1 に示す 8 種類の条件で初期養生を行った。使用した生分解性ゲルは、カルボキシメチルセルロースと水を混合し、電子線やγ線を照射した後に乾燥させたもので、この乾燥ゲルに 30, 60, 100 倍（質量比）の水を吸水（以下、順に G30, G60, G100 と称す）させてペースト状に攪拌した後、試験体の上面に膜厚が 3mm となるよう均等に散布（写真-1 参照）し、コンクリート上面の湿潤状態を保つための養生剤として使用した。なお、当該ゲルの完全膨潤時の吸水量は乾燥ゲル質量の 60 倍であるため、G100 については、40%の水が乾燥ゲルに吸水されず、余剰水として含有していることになる。生分解性ゲルの散布時期については、コンクリートのブリーディング終了後と凝結始発時の 2 水準で検討した。また、比較対象とした被膜養生剤はパラフィンワックス系の材料を使用し、ブリーディング終了後に散布・仕上げを行った。

2.2 試験項目および方法

3 種類の試験体に対して行った試験および評価項目を表-2 に示す。前節で述べた試験体の形状寸法や環境条件は、計測項目や、養生効果に影響を及ぼすブリーディングや乾燥の程度を考慮して選定した。圧縮強度は、全ての試験体に対し表層部のコア（φ70×80mm）を採取し、JIS A 1107 の方法に準拠して試験を行った。Model I で行った水分損失量は、ゲルまたは被膜養生剤散布後の供試体の質量変化を測定することにより行った。Model II で行ったコンクリートのひずみは、コンクリートの表面から 40mm の深さにモールドゲージを設置し、その実ひずみを測定した。透気係数の測定は、コンクリート表面に対し、Torrent 法に準拠して行った。測定に使用した試験機は、内部チャンバーと外部チャンバーの

2 つの構造を有する装置から構成されており、内部チャンバーと外部チャンバーの圧力を等しくコントロールすることで内部チャンバーへの外部からの空気の流入が排除され、内部チャンバー範囲内の透気係数が正確に測定できる仕組みである。Model III では表層部の組織評価のために、水銀圧入法による細孔径分布の測定および SEM による表層部の組織観察を行った。なお、各試験の実施時期については、水分損失量と実ひずみの計測を除き、全て材齢 28 日とした。

2.3 コンクリートの配合および使用材料

Model I ~ III の試験に用いたコンクリートの配合および使用材料は、それぞれ表-3 および表-4 に示す通りである。セメントは全ての配合で高炉セメント B 種を使用した。

表-1 試験体の養生条件

記号	養生方法
なし	養生なし
G30	30倍保水ゲル散布(ブリーディング終了後, t=3mm)のみ
G60	60倍保水ゲル散布(ブリーディング終了後, t=3mm)のみ
G60(始)	60倍保水ゲル散布(凝結始発時, t=3mm)のみ
G100	100倍保水ゲル散布(ブリーディング終了後, t=3mm)のみ
マット	湿潤マット養生(材齢1~7日)のみ
G60(始)+マット	60倍保水ゲル散布(ブリーディング終了後, t=3mm)後 湿潤マット養生(材齢1~7日)
灌水	水散布(凝結始発時, t=3mm)
被膜養生	被膜養生剤散布(ブリーディング終了後, 100ml/m ²)

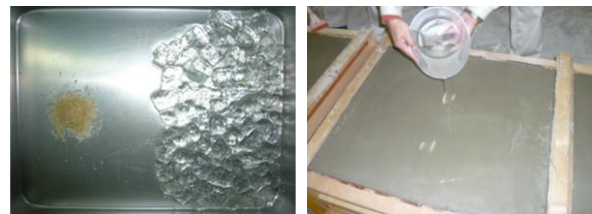


写真-1 生分解性ゲル養生剤

表-2 試験および評価項目

試験体名	環境条件	養生方法								
		なし	G30	G60	G60(始)	G100	マット	G60(始)+マット	灌水	被膜養生
Model I	20°C40%R.H.	●△	●△	●△	●△	●△	●	●	●	●△
Model II	屋外(12~1月)	●■○	—	—	●■○	—	●○	●○	—	●■○
Model III	屋内(2~3月)	●▲□	—	—	●▲□	—	—	—	—	—

●圧縮強度 △水分損失量 ■コンクリートひずみ ○透気係数 ▲細孔径分布 □走査型電子顕微鏡観察

表-3 試験体コンクリートの配合

No.	記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)									
							W	C	S1	S2	S3	S4	G1	G2	Ad1	Ad2
1	Model I	12	4.5	55	44.0	20	166	302	561	240	—	—	1027	—	0.45	—
2	Model II	10	4.5	47.5	43.3	20	161	339	—	—	534	234	—	1038	—	3.39
3	Model III	15	4.5	60.5	46.1	20	168	278	—	—	583	253	—	1005	—	2.78

表-4 使用材料

	記号	種類	物理的・化学的性質
練混ぜ水	W	上水道水	
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³
細骨材	S1	陸砂(鹿島産)	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.76%
	S2	砕砂(笠間産)	表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率1.07%
	S3	陸砂(神栖産)	表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率1.31%
	S4	砕砂(佐野産)	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率1.23%
粗骨材	G1	碎石2005(岩瀬産)	表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.71%
	G2	碎石2005(土浦産)	表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率0.58%
混和剤	Ad1	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
	Ad2	AE減水剤	リグニンスルホン酸系

3. 実験結果および考察

3.1 生分解性ゲルの水分損失特性

図-1は、各養生条件におけるコンクリート表層部からの水分損失量を示したものである。図において、生分解性ゲルを用いた場合の水分損失量の初期値を負の値としているが、これは、生分解性ゲルは散布前に所定の水分を吸水させて使用するため、吸水量の分を負の水分損失量として表示したためである。図より、パラフィン系の被膜養生は養生なしに比べ水分損失量が10%程度低減するが、その効果は小さい。また、図には同一型枠に同一条件で水を張り、その蒸発量(水分損失量)を測定した値も示したが、養生なしおよび被膜養生の場合より水分損失速度(水分損失曲線の初期の傾き)が小さくなっている。これは、次に述べる生分解性ゲルの場合も同様だが、コンクリート仕上げ面または被膜剤散布後の表面は、型枠に水を張ったのみの表面より凹凸が多いため、実質の単位乾燥面積が大きくなること、およびセメントの初期水和により僅かにコンクリートの温度が上昇することに起因しているものと推察される。一方、生分解性ゲルによる養生の場合は、水の損失速度は養生なしおよび被膜養生の場合と同程度であるが、コンクリート表面を湿潤状態に保ちつつ、連続してゲル表面からの水分損失が続いている。更に、水分損失量の変化が僅かとなる経過時間80時間程度におけるコンクリートからの水分損失量は、生分解性ゲルの場合の方が大幅に小さくなっており、養生なしに比べて35%程度低減した。また、生分解性ゲルの使用時の保水率の相違については、水分損失速度に及ぼす影響は小さいが、G60(保水率:60/60)のものに比べ、G30とG100の方が、水分損失量(速度)が僅かに小さくなっている。これは、上記で考察した散布時の表面の凹凸の程度の差、および保水率によりゲル組織への吸着水と間隙水の比率が異なることにより水分損失速度に差が生じたこと、等が起因しているものと推察される。また、生分解性ゲルの散布時期の相違については、ブリーディング終了後に散布したものに比べ、凝結始発時に散布したもの(G60(始))の方が、僅かに小さくなる傾向を示したが、大きな差異はみられなかった。

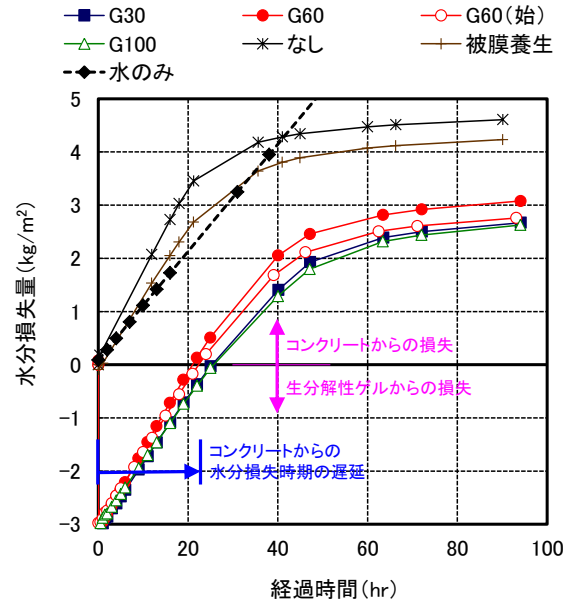


図-1 水分損失量の経時変化

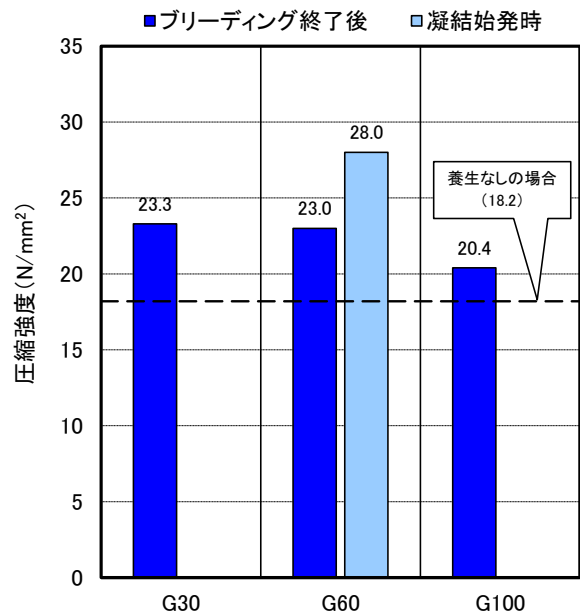


図-2 保水率および散布時期が圧縮強度に及ぼす影響

以上より、生分解性ゲルの極初期材齢における養生の効果は、被膜養生剤のように被膜を形成して水分逸散を抑制して発揮されるものではなく、ゲルが吸水している水を先行して逸散しつつ、表層部の湿潤状態を保つことにより発揮されるものと考えられる。

3.2 養生方法とコンクリートの圧縮強度

図-2は、Model. Iの条件において、ゲルの保水率および散布時期がコア供試体の圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。図より、全ての保水率の場合とも、養生なしの場合より圧縮強度が大きくなり、養生効果が現れている。また、保水率の違いによる影響については、G100のほうがG30やG60に比べて僅かに圧縮強度が小さくなっている。これは、G100の場合は余剰水を多く

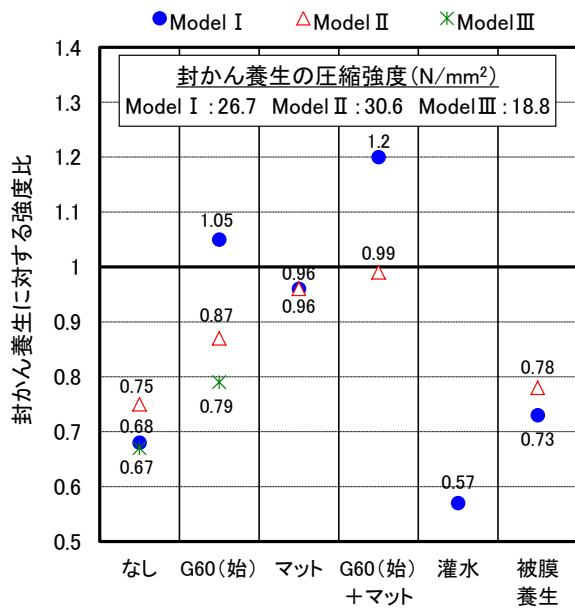


図-3 封かん養生に対する圧縮強度比

含んでいるため、この余剰水がコンクリート中に浸透し、G30やG60に比べて表層部が脆弱になったためであると考えられる。また、散布時期による圧縮強度の違いについては、ブリーディング終了後に比べ、凝結始発後の方が強度発現性は高かった。以上の結果より、圧縮強度の向上効果と施工性（低粘性）の観点から、G60を凝結始発後に散布する条件が最も適切であると判断されたため、Model IIおよびModel IIIの生分解性ゲルを用いる養生は、上記（G60(始)）の条件で行った。

図-3は、各Modelにおいて封かん養生の供試体の圧縮強度に対する、各種養生条件におけるコア供試体の圧縮強度比を示したものである。なお、封かん養生の供試体は、各配合のコンクリートをφ100×200mmのプラスチック製型枠に打設後打設面を密封し、各Modelの供試体近傍に所定の材齢まで静置し作製した。また、各Modelのコア供試体の圧縮強度は、各測定値をJIS A 1107に準拠し高さと直径の比が2.00に相当するよう補正した。図よりコンクリート表層部の圧縮強度は、養生を行わない場合は封かん養生の圧縮強度に比べて30%程度低下するのに対し、生分解性ゲルを散布することによりその低下が抑制されていることがわかる。また、生分解性ゲルの散布に加えて湿潤マット養生を行った場合、湿潤マット養生のみを行った場合以上に圧縮強度が大きくなっており、極初期材齢における養生の効果が大きいことがわかる。特に20℃40%R.H.の最も乾燥の影響を受けやすい環境で養生を行ったModel Iについては、生分解性ゲルの散布のみでも湿潤マット養生を行った場合以上の強度発現性を示しており、強度低下の抑制効果が顕著であった。なお、生分解性ゲルを用いた養生については、既に実構造物への適用もなされており、乾燥条件の厳しい暑中施

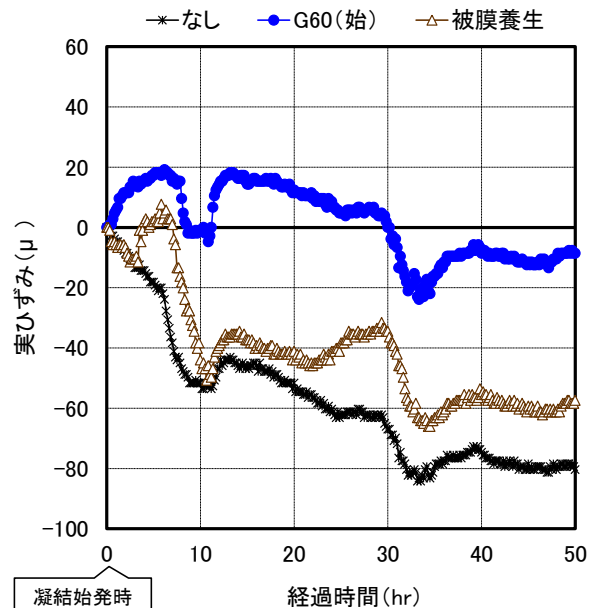


図-4 実ひずみの経時変化

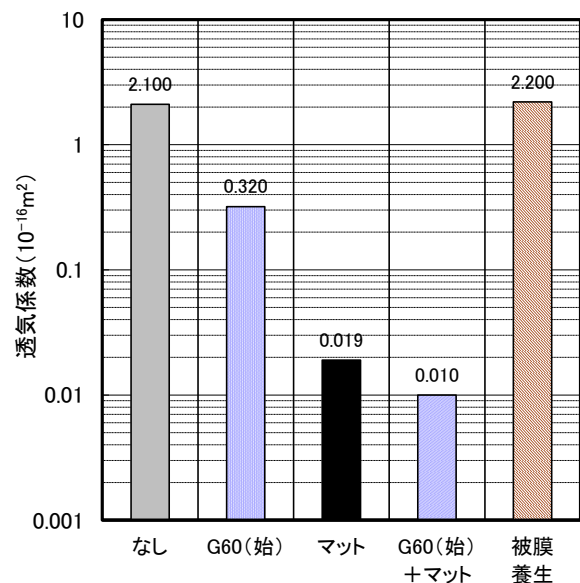


図-5 養生方法と透気係数の関係

工の場合において、同様の効果が確認されている。

以上のように、生分解性ゲルの散布によりコンクリートの強度発現性が向上する要因としては、既往の文献⁹⁾⁷⁾で考察されている散布直後からコンクリート表層部の間隙水が吸水され、表層部近傍のコンクリートの実質水セメント比が低減したこと等が考えられる。

3.3 養生方法と表層部の収縮

図-4は、コンクリート表層部の実ひずみ（温度補正を加えていないひずみ）を示したものである。生分解性ゲルを散布した試験体は、養生なしおよび被膜養生のものに比べ極初期材齢から収縮ひずみが大幅に小さく、また測定終了時（50時間経過）における収縮量も小さくなっている。これより、生分解性ゲルを用いた養生により、

極初期材齢におけるプラスチック収縮を大幅に低減でき、初期材齢における収縮ひび割れの発生の抑制に対して効果が期待できる。

3.4 養生方法と表層部の透気性

図-5 はコンクリート表面の透気係数を示したものである。生分解性ゲルを散布した試験体は、養生なし比べて透気係数が小さくなっている。既往の文献⁸⁾によると、透気係数は表-5 に示す 5 段階で評価されており、この評価方法に準拠すると、養生なしや被膜養生の場合は「劣」と評価されるのに対し、生分解性ゲルの散布のみでも「一般」に向上している。また、生分解性ゲルの散布に加えて湿潤マット養生を行った場合は「良」であり、湿潤マット養生と同じ評価となるが、透気係数の値は 5 割程度まで小さくなる傾向を示しており、これらの結果から、生分解性ゲルの散布により、コンクリートの表層部の組織が緻密化することが明らかとなった。

3.5 養生方法と表層コンクリートの硬化組織

養生なしの場合、生分解性ゲルを散布した場合のコンクリートについて、表層部（表面から 0~10mm）の細孔径分布とその積算細孔容積を図-6、図-7 に示し、表層部（表面から 0~5mm）の SEM 観察像を写真-2 に示す。図-6、図-7 の結果は、生分解性ゲルを散布した場合、養生なしものに比べて 0.1~数 μm 周辺の細孔容積が少なく、0.02 μm より小径側の細孔容積が多く、また、積算細孔容積も若干少なくなることを示している。これは、生分解性ゲルで極初期から湿潤養生条件を保つことで、コンクリート表層部の水和組織がより緻密になったものと考えられる。また、写真-2 の SEM 観察像から、養生を行っていない場合、針状のエトリンガイトが粒子間の空隙を埋めている様子が多く確認され、比較的結晶が成長し易い空間が多く存在したのに対し、生分解性ゲルを散布した場合は、無定形の C-S-H の他、粗大化した水酸化カルシウムが多くみられ、エトリンガイト等は殆どみられず、水和組織がより緻密化していることが確認できる。これは、前述の透気係数の結果と一致するものである。

4. まとめ

生分解性吸水高分子ゲルを用いたコンクリートの養生効果を検討した結果、以下のような事項が明らかとなった。

- (1) 生分解性ゲルの極初期材齢における養生の効果は、主にゲルが吸水している水を先行して逸散しつつ、他の養生方法に比べ、極初期材齢から表層部の湿潤状態を長時間保つことにより発揮される。
- (2) 生分解性ゲルの保水率の相違が湿潤条件を保つ効果に及ぼす影響は小さいが、保水率を小さくして使用

表-5 透気係数の評価

	透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)				
	0.001 ~ 0.01	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 1	1 ~ 10	10 ~ 100
評価	優	良	一般	劣	極劣

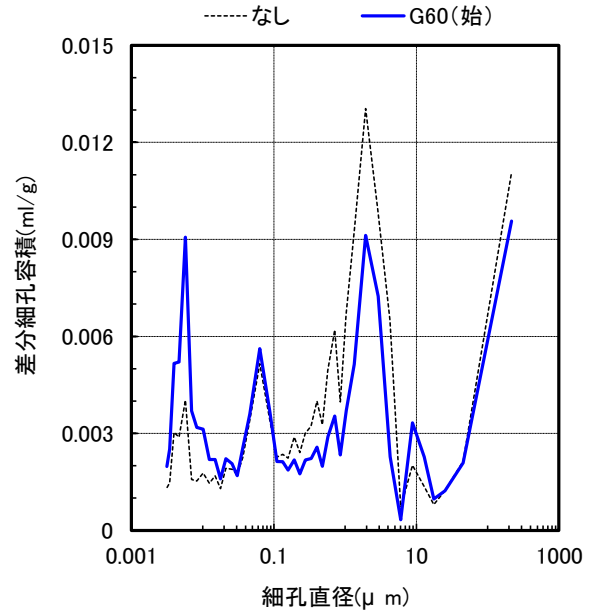


図-6 細孔径と差分細孔容積の関係

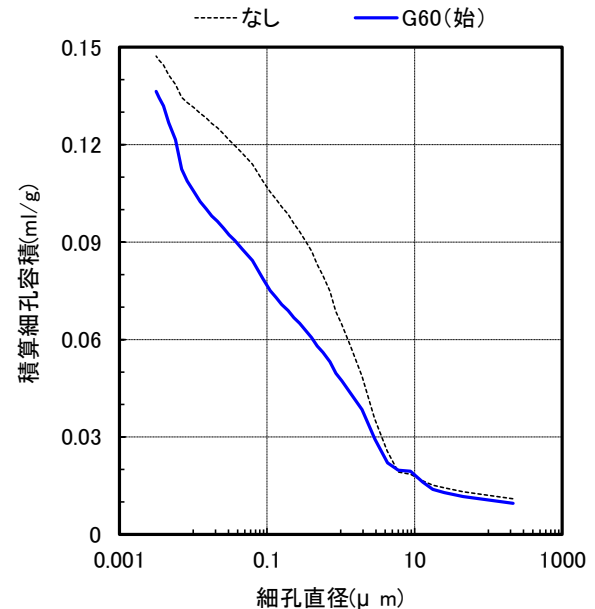


図-7 細孔径と積算細孔容積の関係

した方が、表層近傍のコンクリートの圧縮強度は大きくなる。

- (3) 生分解性ゲルの散布時期は、表層コア供試体の圧縮強度に影響を及ぼし、ブリーディング終了後より凝結始発後に散布した方が圧縮強度は大きくなった。
- (4) 生分解性ゲルのみの散布または湿潤マット養生と併

Et : エトリンガイト S : スラグ (高炉) P : 水酸化カルシウム

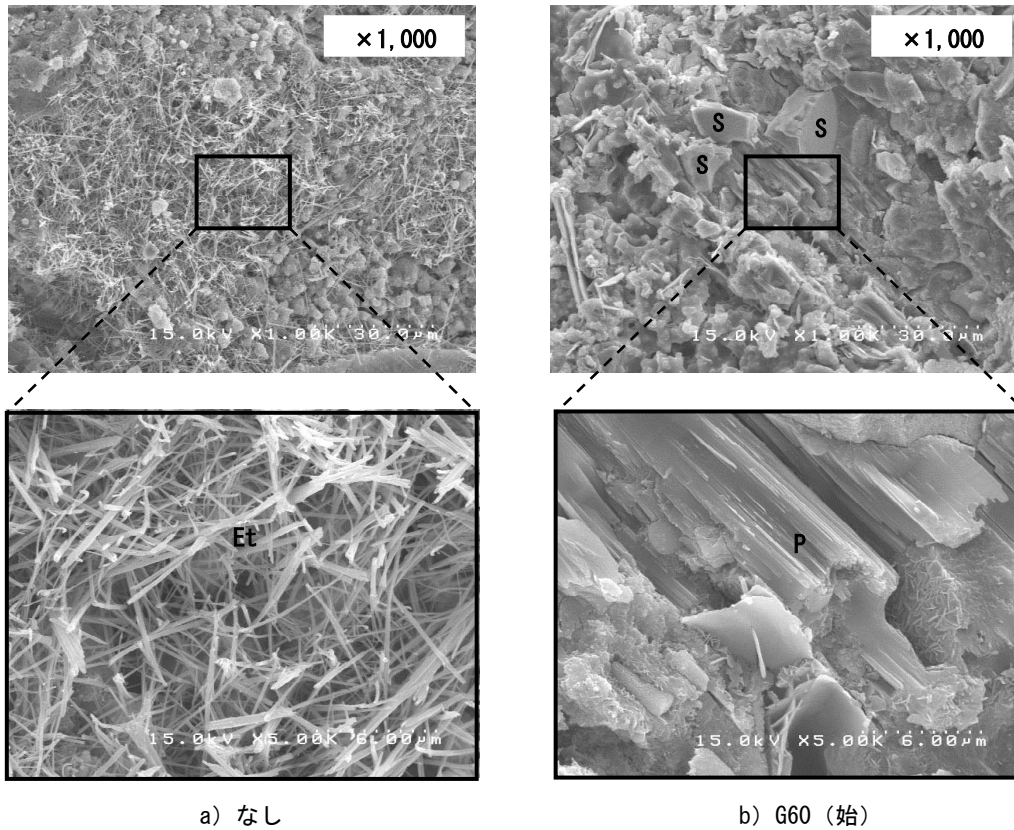


写真-2 走査型電子顕微鏡観察像

- 用することにより、養生なしや湿潤マット養生のみの場合に比べて表層近傍のコンクリートの圧縮強度は大きくなる。
- (5) 生分解性ゲルにより養生した場合、養生なしまたはパラフィン系被膜養生剤を用いた場合に比べ、極初期材齢からコンクリート表層部の収縮ひずみが大幅に小さくなるため、プラスチック収縮を大幅に低減でき、初期材齢における収縮ひび割れの発生の抑制効果が期待できる。
- (6) 生分解性ゲルにより養生した場合、養生なしまたはパラフィン系被膜養生剤を用いた場合より、コンクリート表層部の透気係数が小さくなった。また、細孔径分布の測定および SEM 画像観察結果から、コンクリート表層部の水和組織がより緻密になることがわかった。

参考文献

1) 宮沢伸吾, 田澤栄一, 中山良直 : モルタルのプラスチック収縮特性, 土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 35-36, 1985

2) 馬場勇介, 笠井哲郎 : 低水比セメントペーストのプラスチック収縮に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 760-761, 1998

3) 馬場勇介, 笠井哲郎 : 水和収縮に着目した極初期材齢におけるセメントペーストの体積変化に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.287-299, 2007.5

4) 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

5) 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

6) 片岡弘安, 湊田安浩, 人見尚 : 吸水ポリマーを利用した誘発目地ひび割れ部の漏水防止に関する研究, セメント系材料の自己治癒に関するシンポジウム論文集, JCI-C79, pp.169-172, 2011

7) 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

8) 歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会 (216 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2009