

## シート養生がプレキャスト製品の諸物性に及ぼす影響

### A Study on the Influence of the Sheet Curing Method on the Physical Properties of Precast Concrete Products

濱田 那津子      中谷 俊晴      芦澤 良一  
渡邊 賢三      坂井 吾郎

#### 要 約

美シール®工法は、高い撥水性を有する熱可塑性樹脂シートを予め型枠内面に貼付してコンクリートを打ち込み、脱型した後も熱可塑性樹脂シートをコンクリート側に残すことで、表面気泡を低減しつつ、さらにコンクリート表面を一度も外気に曝すことなく、水分の逸散を抑制できる養生技術である。場所打ちコンクリートを対象とした検討および実績は多数あるものの、プレキャスト製品を対象とした検討はこれまで行っていない。そこで、本工法を用いて冬期に作製された壁高欄プレキャスト製品を非破壊試験で検討したところ、シートにより蒸気養生後の急激な水分逸散を抑制することができ、耐久性が向上することが明らかになった。また、解析を用いてコンクリートの物性値の評価を行い、本工法がコンクリートの水和度を高め、毛細管空隙を緻密にする現象を定量的に明らかにした。

#### 目 次

- I. はじめに
- II. 実規模サイズの試験体を対象とした検討
- III. 解析によるコンクリートの物性値予測
- IV. おわりに

#### I. はじめに

2017年制定のコンクリート標準示方書【施工編】<sup>1)</sup>(以下、示方書と称する)において、プレキャストコンクリートの章が新設されるなど、コンクリート構造物の品質向上や工程短縮が期待できるプレキャスト製品の適用拡大に向けた動きが進展している。

プレキャスト製品は、コンクリートの硬化促進を目的として、型枠にコンクリートを打ち込んだ後に、養生槽内で高温の蒸気による養生が施される。蒸気養生を用いて製造したコンクリートは、脱型の際に外気の影響を受けやすい。特に、蒸気養生や脱型後の追加の養生(以下、二次養生と称する)の条件によっては、微細なひび割れが発生し、スケーリング抵抗性や塩分浸透性に悪影響を及ぼすことが小型サイズの供試体を用いた実験によって確認されている<sup>2), 3)</sup>。

筆者らは、場所打ちコンクリートを対象として、Fig.1に示すように、予め型枠内面に高い撥水性を有する熱可塑性樹脂

シート(以下、シートと称する)を貼付し、コンクリートを打ち込み、脱型時にはシートのみをコンクリート側に残す養生技術(以下、シート養生と称する)を開発している。シートの高撥水性により表面気泡を低減する<sup>4)</sup>とともに、コンクリート表面を一度も外気に曝すことなく、水分の逸散を長期間抑制することが可能である。このシート養生によりプレキャスト製品においても急激な乾燥を防ぐことができ、コンクリート表層部の耐久性向上につながると考えられる。

本論文では、冬期に作製された壁高欄プレキャスト製品の一部にシート養生を適用し、その効果を非破壊試験により評価し、解析を用いてコンクリートの物性値の評価を行った。

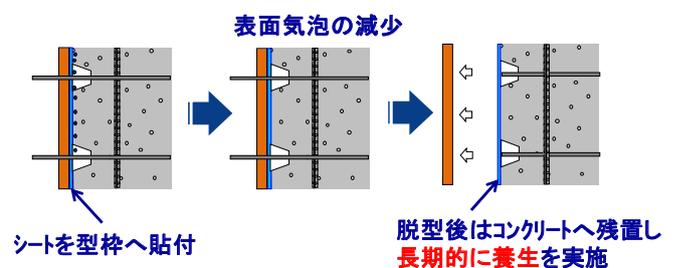


Fig.1 シート養生  
(Method of Sheet Curing)

**キーワード:** 工場製品, プレキャストコンクリート, 熱可塑性樹脂シート, 蒸気養生

**Keywords:** precast products, precast concrete, thermoplastic resin sheet, steam curing

II. 実規模サイズの試験体を対象とした検討

1. 実験概要

(1) 試験体概要

試験体は Fig.2 に示すように、上部の厚さ 250 mm、下部の厚さ 350 mm、高さ 1260 mm、長さ 2490 mm の壁高欄用部材とし、北海道のプレキャスト工場において 1 月に作製した。Fig.2 の上下を反転させた状態で 2 層に分けてコンクリートを打ち込み、締固めを行った。

(2) コンクリートの配合

使用材料を Table 1 に、コンクリートの配合を Table 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、ひび割れ防止を目的として膨張材を使用した。

(3) 養生条件

蒸気養生として、20℃で2時間の前養生を行った後に30℃/hで昇温し、35℃で4時間保持し、そのあと自然放冷させた。材齢19時間で脱型し、材齢48時間まで試験体を工場内で保管した後、屋外に移動した。

2体の壁高欄用部材を同日に作製し、一方にのみシート養生を123日間適用し、もう一方はシート養生を適用しなかった。型枠へのシートの貼付け状況を Photo 1 に示す。シート養生を適用したケースでは、側面にはシート養生を適用し、つま面にはシート養生を適用せず、脱型後ただちに水分の逸散を抑制するためにシートを貼りつけた。なお、工場内の環境温度は2℃程度であった。

(4) 試験項目および試験方法

試験項目を Table 3 に示す。コンクリート打込み前にスランブ、空気量およびコンクリート温度を測定した。コンクリート表面と養生槽内に温度計を設置し、製造過程における温度を経時的に測定した。

また、材齢123日においてシート撤去後に、非破壊試験として、表面反発硬度、表面気泡面積率、表面含水率、透気係数、表面吸水速度、超音波伝播速度の測定を実施した。

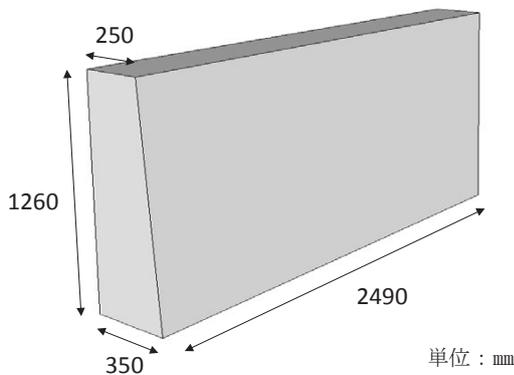


Fig.2 試験体概要  
(Schematic Diagram of Precast Product)



Photo 1 型枠へのシートの貼付状況  
(Paste Sheet on Formwork Situation)

Table 1 使用材料  
(Properties of Concrete Materials)

材 料	記号	摘 要
水	W	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 (g/cm <sup>3</sup> )
膨張材	Ex	エトリンガ <sup>®</sup> 付系、密度：2.95 (g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	川砂、表乾密度：2.72 (g/cm <sup>3</sup> ) F.M. 2.76
粗骨材	G	川砂利、表乾密度：2.77 (g/cm <sup>3</sup> ) 実積率：60.9%
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
空気調整剤	AE	陰イオン界面活性剤

Table 2 配合  
(Mix Proportion of Concrete)

W/B <sup>※</sup> (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	Ex	S	G	SP
33.0	38.5	154	437	30	673	1095	1.87

※ B = (C+Ex)

目標スランブ：17±2.5 cm 目標空気量：4.5±1.5%

Table 3 試験項目  
(Standard Measurement Method)

試験項目	方法
スランブ 空気量	JISA1101, JISA1128 に準拠
表面温度 環境温度	試験体の表面と、 養生槽内に温度計を設置
圧縮強度	JISA1108 に準拠 材齢 18 時間、14 日に試験
表面反発硬度	シュミットハンマーにより測定 (N=3)
表面気泡 面積率	透明シートに気泡をトレースし 画像分析 (N=1)
表面含水率	静電容量法に準拠 (N=9)
透気係数	材齢 124 日に Torrent 法に準拠 (N=3)
表面吸水速度	材齢 124 日に SWAT 法に準拠 (N=4)
超音波 伝播速度	超音波測定器にて測定 (N=3)

## 2. 実験結果

### (1) フレッシュ性状

製造時におけるスランプは 17.5 cm, 空気量は 5.1%, コンクリート温度は 13°C であり, スランプおよび空気量は目標の範囲内であった。

### (2) 脱型時の状況

Photo 2 に脱型状況を示す。シート養生なしのケースは湯気が出ているのに対し, シート養生ありのケースはシートで覆われているため湯気がまったく確認されなかった。シートにより周辺環境との温・湿度差による急激な乾燥を防ぐことができたと考えられる。

### (3) 温度履歴

Fig.3 に打込み後から材齢 108 時間までの試験体の表面温度を示す。シート養生を実施した表面温度はシート養生なしのケースと比べ, 脱型直後から 3°C 程度高く, この温度差は材齢 72 時間まで持続した。これは, シート養生によって水分の逸散が抑制されたことで, 気化熱による温度低下が抑えたこと, さらに, 厚さ 0.2 mm の薄いシートではあるものの一定の保温効果が得られたことによると考えられる。

### (4) 表面反発硬度

シート養生を適用した場合の表面反発硬度は 42.8R であり, シート養生を適用していない場合は 42.0R と同程度であった。なお, 材齢 18 時間における脱型時の圧縮強度は 16.2N/mm<sup>2</sup> であり, 材齢 14 日における圧縮強度は 47.5N/mm<sup>2</sup> であった。

### (5) 表面気泡面積率

表面気泡面積率の結果を Fig.4 に示す。シート養生を適用した場合の表面気泡面積率の平均は 0.03% であり, シート養生を適用していない場合の 0.17% に比べて, 表面気泡が 1/5 程度に低減することを確認した。これは, シート表面が平滑であることや, 高い撥水性を有することが影響しているものと推察される。

### (6) 表面含水率

シート養生を適用した場合のシート撤去後の表面含水率は 7.3% であり, シート養生を適用していない場合の 5.2% に比べて, 材齢 123 日においてもシートによりコンクリート中に水分が保持できていることを確認した。なお, シートを撤去した翌日に測定した表面含水率は 6.1% であった。後述する透気係数や表面吸水速度は表面含水率の影響を受けることが報告されている<sup>5)</sup>。今後, 同等の表面含水率の時点においてシート養生の効果を検証するため, 本試験体は屋外にて暴露を行い, 長期的に評価を実施する予定である。

### (7) 透気係数

透気係数の測定結果を Fig.5 に示す。透気係数は, シート養生を適用した場合は 0.008 × 10<sup>-16</sup>/m<sup>2</sup> であり, 評価ランクは「優」であった。一方, シート養生を適用していない場合は 0.058 × 10<sup>-16</sup>/m<sup>2</sup> であり, 評価ランクは「良」であった。一



シート養生なし                      シート養生あり

Photo 2 脱型状況  
(Unframed Situation)

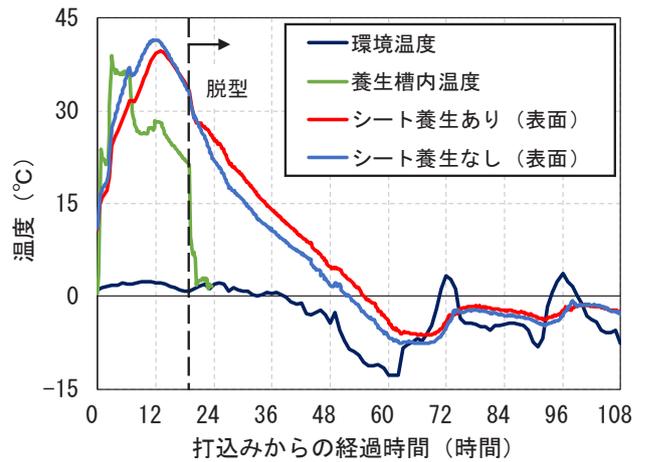


Fig.3 試験体の表面温度と環境温度  
(Product Surface Temperature and Outside Temperature)

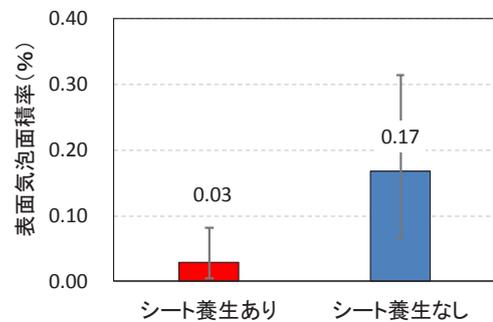


Fig.4 表面気泡面積率の測定結果  
(Results of Surface Void Measurement)

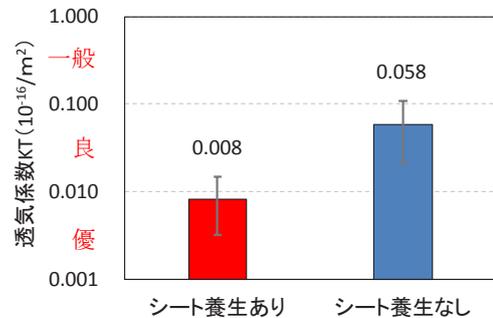


Fig.5 透気係数の測定結果  
(Results of Air Permeability Coefficient Measurement)

一般に透気係数は、その値が小さいほど物質移動抵抗性が高く、コンクリートが緻密で表層品質が高いことを表している。シート養生を適用することで、透気係数が小さくなり、表層品質が向上することを確認した。

(8) 表面吸水速度

表面吸水速度の測定結果を Fig.6 に示す。表面吸水速度はシート養生を適用した場合が 0.042ml/m<sup>2</sup>/s、シート養生を適用していない場合が 0.086ml/m<sup>2</sup>/s であり、ともに「良」の評価ランクであった。一般に表面吸水速度は、透気係数と同様にその値が小さいほど物質移動抵抗性が高く、コンクリートが緻密で表層品質が高いことを表す。同ランク内ではあるが、透気係数と同様に、表面吸水速度の結果からもコンクリートの表層品質が向上することを確認した。

(9) 超音波伝播速度

超音波伝播速度の測定結果を Fig.7 に示す。シート養生を適用した場合の超音波伝播速度は 4040m/s であり、シート養生を適用していない場合は 3782m/s であった。一般的に健全なコンクリートの超音波伝播速度は 4000m/s 程度とされており<sup>6)</sup>、速度の速い方がコンクリート組織が緻密なことを表す。シート養生を適用することにより、5%程度早い超音波伝播速度となり、コンクリート組織がより緻密になっていると考えられる。

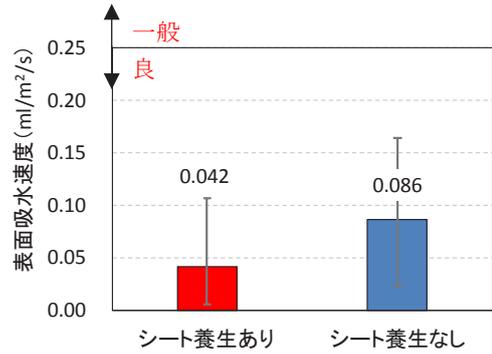


Fig.6 表面吸水速度の測定結果 (Results of Surface Water Absorption Rate Measurement)

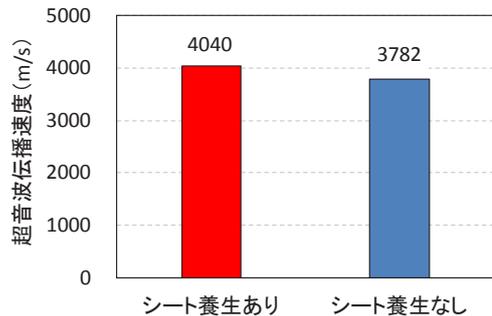


Fig.7 超音波伝播速度の測定結果 (Results of Ultrasonic Wave Velocity Measurement)

Ⅲ. 解析によるコンクリートの物性予測

シート養生による水分の逸散を抑制する効果がコンクリートの水と度および空隙構造に与える影響を評価するため解析を実施した。

1. 解析モデルおよび解析条件

(1) 解析モデル

解析にはセメントの水和反応、空隙構造の形成、水分移動・保持などミクロな材料応答を熱力学的知見に基づきモデル化した物質平衡・移動解析システム<sup>7)</sup> (DuCOM) を用いた。

(2) 解析条件

コンクリートの発熱および熱移動は、セメント種類および配合から求めた。なお、膨張材はセメントと同一の発熱特性を示すと仮定し、シートの保温性の影響は考慮していない。コンクリート表層と外気における境界条件を Table 4 に示す。シート養生は 91 日実施し、蒸気養生後から材齢 91 日まで、コンクリートと外気の水分移動はないものとした。また、シート養生なしのケースは蒸気養生後から外気とコンクリートにおいて水分の移動が生じるものとした。解析は材齢 7 年まで実施した。

2. 解析結果

(1) コンクリート温度

Fig.8 に材齢 108 時間までにおけるコンクリート温度の解析結果を示す。解析によって得られた温度は実測値と時間に

Table 4 境界条件 (Boundary Condition)

養生条件	シート養生あり (91 日)		シート養生なし	
	温度	湿度	温度	湿度
蒸気養生中	実測値	100%	実測値	100%
材齢 91 日まで	※	水分移動なし	※	※
材齢 91 日以降		※		

※気象庁データ (札幌) 5 年分の平均<sup>8)</sup>

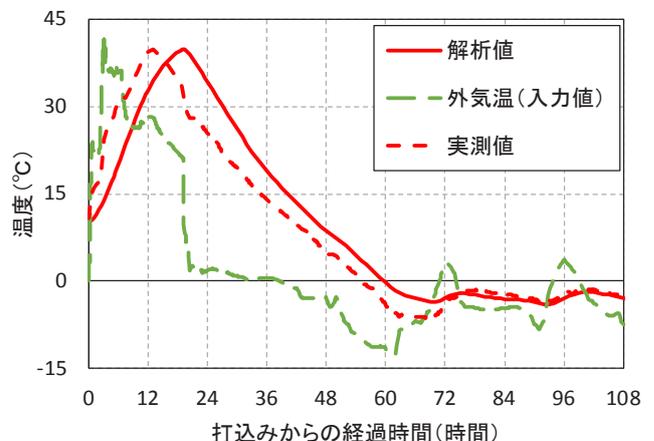


Fig.8 解析によって求められたコンクリート温度 (Concrete Temperature by Analysis)

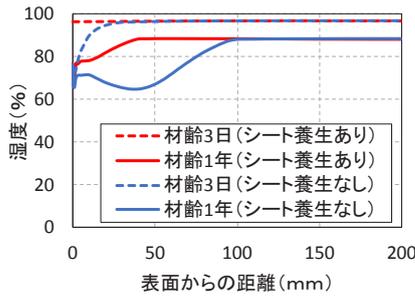


Fig.9 解析によって求められたコンクリート湿度  
(Concrete Humidity by Analysis)

誤差はあるものの、最高温度は実測値と概ね一致していた。水和反応による発熱量を適切に再現できたと考えられる。

(2) コンクリート中の湿度

Fig.9に材齢3日と材齢1年におけるコンクリート中の湿度を示す。シート養生ありは材齢3日における湿度が表面と内部で変わらず97%であり、材齢1年においては、ごく表面は68%まで下がるものの、20mmで80%、35mmより以深では88%で一定となった。一方、シート養生なしは材齢3日におけるコンクリート表面の湿度が67%まで低下し、材齢1年においてはごく表面で67%、40mmで最小の65%、100mmの深さまで湿度低下が生じる結果となった。材齢91日までのシート養生により、材齢1年においてもコンクリートの湿度は高く、湿潤状態になると考えられる。

(3) 水和度

Fig.10に材齢7年における水和度の解析結果を示す。シート養生ありは、表面と内部で水和度が90%で変わらない結果となった。一方、シート養生なしは表面から50mm程度までの領域において水和度の低下が認められた。この表層50mmまでの水和度の平均値の経時変化をFig.11に示す。シート養生ありは材齢91日までに水和度が90%となっており、それ以降の水和度に変化はみられなかった。一方、シート養生なしは材齢91日における水和度が75%であり、材齢が経つにしたがって徐々に水和が進行するものの、材齢7年においても水和度は77%とシート養生ありの5/6程度であった。ここで、シート養生がコンクリートの水和度に影響を及ぼす理由を考察する。コンクリートが硬化する際、photo 2に示したように著しい水分逸散が生じると、表面が著しい乾燥状態となり十分な水和反応が行われぬ。一方、シート養生を材齢91日まで適用し、表層部からの長期間の水分の逸散を抑制することで、コンクリート中の水分を確実に水和反応させることができると考えられた。

(4) 毛細管空隙量

Fig.12に材齢7年における毛細管空隙量の解析結果を示す。シート養生ありは、表面と内部で毛細管空隙量が $0.022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ で変わらない結果となった。一方、シート養生なしは表面から50mm程度までの領域において毛細管空隙量の増大が認められた。この表層50mmまでの毛細管空隙量の平均

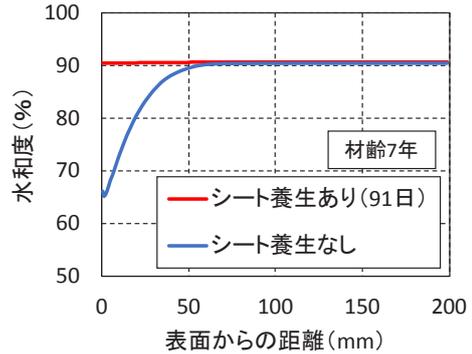


Fig.10 水和度の解析結果  
(Degree of Hydration Determined by Analysis)

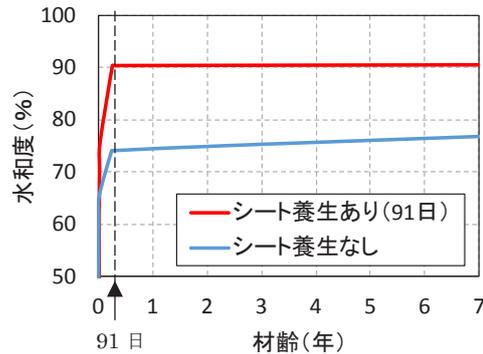


Fig.11 水和度の経時変化 (解析結果)  
(Temporal Change of Hydration Degree by Analysis)

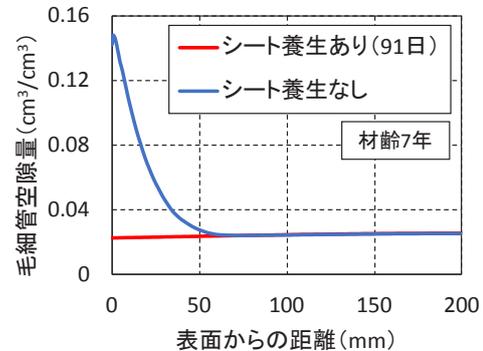


Fig.12 毛細管空隙量の解析結果  
(Capillary Void Volume Determined by Analysis)

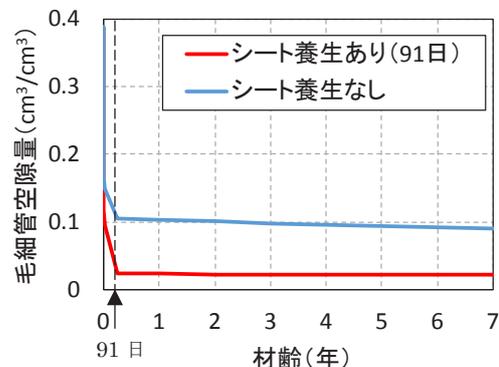


Fig.13 毛細管空隙量の経時変化 (解析結果)  
(Temporal Change of Capillary Void Volume by Analysis)

値の経時変化を Fig.13 に示す。材齢 7 年における表層 50 mm までの毛細管空隙量の平均値は、シート養生ありが  $0.022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、シート養生なしが  $0.089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  であり、シート養生により毛細管空隙量が 1/4 程度に低減される結果であった。既往の研究<sup>9)</sup>においては、毛細管空隙と考えられる 100nm 程度以下の空隙径が窒素透過率などの物質移動抵抗性に影響を及ぼすと報告されている。前述した材齢 123 日における透気係数および表面吸水速度の結果からも、シート養生を適用することにより毛細管空隙量を低減することができ、物質移動抵抗性の向上に寄与すると考えられる。

#### IV. おわりに

本論文では、シート養生がプレキャスト製品の耐久性に与える影響を検討するために、非破壊試験による評価および解析によるコンクリートの物性評価を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ①シート養生により、プレキャスト製品の脱型直後に湯気が発生せず、外気との温度差による急激な乾燥を防ぐことができた。また、シートにより水分の保持が長期間可能となり、シート撤去まで高い表面含水率であることが確認された。
- ②シートの高撥水性および平滑性により、表面気泡面積率が低減できることが確認された。
- ③シート養生を適用したケースでは、透気係数および表面吸水速度が小さくなり、物質透過抵抗性が向上することが確認された。また、超音波伝播速度が速くなり、コンクリートの組織が緻密であることが確認された。
- ④シート養生により、水和反応が確実に進行し、毛細管空隙量が低減することで物質抵抗性が向上することを非破壊試験と解析により明らかにした。
- ⑤養生の効果の範囲は表層 50 mm の範囲であることを解析により明らかにした。

今後、本検討に用いた試験体は屋外にて暴露を行い、長期的な耐久性のデータを取得する予定である。

#### 参考文献

- 1)土木学会；コンクリート標準示方書[施工編]，2018.
- 2)大塚浩司，庄谷征美，阿波稔；蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響，土木学会論文集，No.585/Vol.38，1998，pp.97-111.
- 3)岩城一郎，子田康弘，上原子晶久，諸岡等；塩分環境下における高炉セメントを用いた蒸気養生コンクリートのスケーリング抵抗性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.3，2010，pp.23-30.
- 4)吉田祐麻，渡邊賢三，温品達也，石田哲也；せき板表面の撥水性と粗度がコンクリートの表面気泡に与える影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，vol.39，No.1，2017，pp.2155-2160.
- 5)早川健司，水上翔太，加藤佳孝；表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，2012，pp385-398.
- 6)日本コンクリート工学会；コンクリート診断技術‘14 [基礎編]，2014，p.113.
- 6)前川ら；Multi-scale Modeling of Concrete Performance Journal of Advanced Concrete Technology vol.1 No.2，2003.7，pp.91-126.
- 7)気象庁『過去の気象データ・ダウンロード』；<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php#!table>，2019年3月確認
- 8)酒井雄也，中村兆治，岸利治；閾細孔径と透気・透水および気体の透過挙動との対応に関する研究コンクリートの構造とその物性，セメントコンクリート論文集 Vol.67，2013，pp.464-471.

### A Study on the Influence of the Sheet Curing Method on the Physical Properties of Precast Concrete Products

*Natsuko Hamada, Nakatani Toshiharu, Ryoichi Ashizawa,  
Kenzo Watanabe and Goro Sakai*

We have developed a new long-term curing method in which thermoplastic resin sheet is attached to the surface of the formwork, concrete is placed, and the sheet is left there even after the formwork is removed. Although many studies have been conducted and results reported for casting concrete using this method, there have been no studies on precast products. In the present study, the method was applied to precast products manufactured in winter, and the effects were confirmed. As a result, it was observed that the sheet suppressed the escape of moisture and nondestructive testing showed that the durability was improved. In addition, the physical property values of concrete were predicted by analysis, and the influence of the method on the degree of hydration of the concrete and the amount of void space in capillaries were checked. The results showed improvements of the tested parameters.