

# 論文 製造時期および二次養生方法の違いがプレキャストコンクリート製品の諸物性に及ぼす影響

中谷 俊晴\*1・渡邊 賢三\*2・坂井 吾郎\*3・石田 哲也\*4

**要旨：**製造時期や蒸気養生後の養生方法の違いがプレキャストコンクリート製品の諸物性に与える影響について評価するために、製品工場において実規模サイズの試験体を製造し、各種試験を実施した。その結果、冬期に製造した場合、脱型時の外気との温度差や蒸気養生後の乾燥に起因して、試験体に微細ひび割れが発生し、コンクリートの品質に悪影響を及ぼす可能性が確認された。これに対し、夏期に製造した場合や、冬期においてもコンクリート打込み時からシートで水分逸散抑制の養生を適用した場合には、微細ひび割れが低減でき、良好な品質を確保できることがわかった。

**キーワード：**工場製品、蒸気養生、シート養生、水分逸散抑制養生、微細ひび割れ、細孔構造、スケーリング

## 1. 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(以下、PCaと称する)製品の適用拡大に向けた動きが進展している。

PCa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。示方書においては、蒸気養生時の温度管理に留意することや、脱型後の追加の養生(以下、二次養生と称する)として湿潤養生および保温管理の必要性について明記されているものの、PCa製品の二次養生方法などは未だPCa製造工場(以下、工場と称する)の経験則によって行われていることが多い<sup>2)</sup>。

蒸気養生を用いて製造したコンクリートは、蒸気養生後の脱型の際に外気の影響を受けやすく、品質が劣る可能性が指摘されている。特に蒸気養生や二次養生の条件によっては、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>3), 4)</sup>。

本研究では、製造時の環境条件や二次養生の違いがPCa製品の品質に及ぼす影響について検討することを目的として、工場において実規模サイズの試験体を製作し各種試験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要および試験要因

関東地方の工場にて図-1に示す壁高欄を模擬した試験体を製作した。図-1を上下反転させた状態で2層に分けて

コンクリートを打ち込み、φ50mmの棒状バイブレータにて2カ所/層、15秒/箇所の振動締め固めを行った。製作後、神奈川県小田原市の風雨の影響を受けるヤードにて、材齢3日より試験体を暴露した。

試験要因を表-1に示す。試験体の製造時期は、夏期(7月)と冬期(1月)とした。また、二次養生の影響についても確認するために、「シートの有無」を試験要因に設け、シート有ではシート養生<sup>5)</sup>を材齢182日まで適用した。

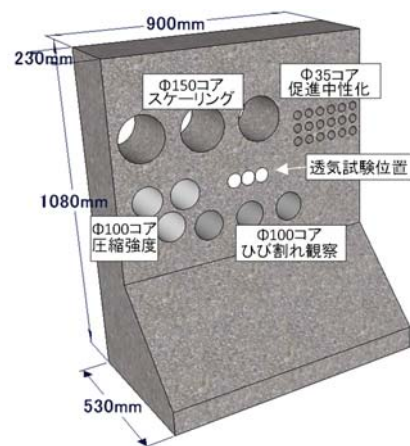


図-1 試験体概要

表-1 試験要因

略記	製造時期	蒸気養生	二次養生
夏-シート無	2017/7/8	夏期設定	シート養生無し
夏-シート有			シート養生有り
冬-シート無	2018/1/19	冬期設定	シート養生無し
冬-シート有			シート養生有り

\*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 研究員 (正会員)

\*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ グループ長 博士(工学) (正会員)

\*4 東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

ここで、シート養生とは、図-2 に示すように予め型枠内面に半透明な厚さ 0.2 mm の高撥水性（接触角：97 度）の特殊シート（以下、シートと称する）を貼付し、型枠を取り外した後もシートをコンクリートに残置させるものである。シートの撥水性によって表面気泡を低減でき、さらに、コンクリート表面を 1 度も外気に曝すことなく長期間に亘る養生により、コンクリート表層部の緻密化が図られる。一方、シート無では、脱型直後からコンクリート表面が外気に曝される状態となる。

## 2.2 コンクリートの配合

表-2 および表-3 に、コンクリートの使用材料および配合を示す。セメントは高炉セメント B 種を使用した。水セメント比は、夏期の製造時において材齢 14 日の圧縮強度が 35N/mm<sup>2</sup> を満足するように設定し、冬期も同一とした。目標空気量は、凍結融解抵抗性について比較するために、±0.5% を許容値として管理した。

## 2.3 蒸気養生条件

試験体を製作した工場における蒸気養生の条件を図-3 に示す。前養生時間や最高温度、最高温度保持時間は、示方書に明記された条件を満足するものとした。

## 2.4 試験項目および試験方法

表-4 に試験項目を示す。コンクリート打込み前にスランプ、空気量およびコンクリート温度を測定した。製造時には、図-1 に示した透気試験位置の深さ 115 mm に設置した温度計で、試験体の内部温度を経時的に計測し、外気温および、養生槽内の温度（以下、環境温度と称する）についても計測した。また、脱型時には画像分析による

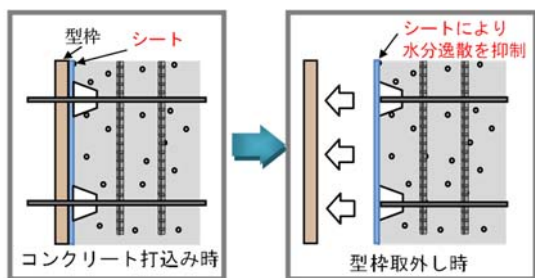


図-2 シート養生の概念図

表-2 使用材料

材料名	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	高炉セメント B 種，密度 3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砕砂，密度 2.64g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率 2.84
粗骨材	G	砕石，密度 2.70g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率 6.71 最大寸法：20 mm
混和剤	Ad	高性能減水剤 主成分：ポリカルボン酸系化合物

表面気泡面積率の算出、試験体の外観やひび割れなどの状況を目視確認するとともに、Torrent 法を用いた表層透気試験を実施した。そして、図-1 に示すように φ 35mm，φ 100 mm，φ 150 mm のコンクリートコアを採取した。φ

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	Ad
42.6	44.0	160	376	780	1015	4.51

※ 目標スランプ 12±2.5cm，空気量 4.5±0.5%

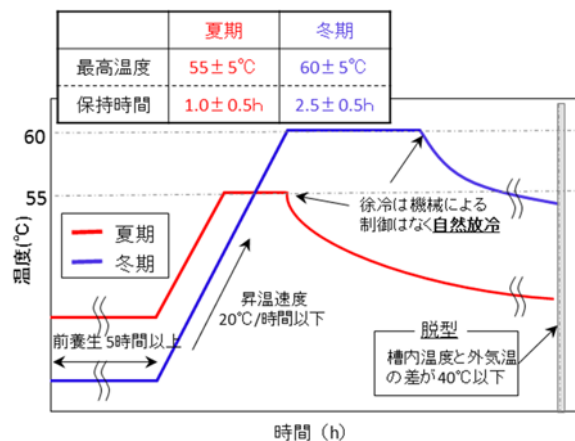


図-3 蒸気養生の条件

表-4 試験項目

試験項目	摘要
スランプ・空気量	JIS A 1101, JIS A 1128 コンクリート打込み前に実施
脱型状況の確認	脱型時の試験体の状況を目視確認
試験体温度および環境温度	試験体の中心部と、養生槽内に温度計を設置
表面気泡	透明シートにトレース N=1
ひび割れ	①脱型直後に目視確認 ②材齢 189 日に φ 100 のコアを採取し画像分析 N=3
圧縮強度	JIS A 1108 N=3 <テストピース>材齢 7・14・28 日 試験体と同様の蒸気養生を実施 ※シート無のみ <試験体コア>材齢 189 日 N=3
透気試験	Torrent 法 N=3
電気抵抗率	四電極法 N=4
促進中性化試験	JIS A 1153 N=3 材齢 189 日にコア採取
空隙率試験	水銀圧入法 N=3 材齢 189 日にコア採取 表面から 5, 7-12, 14-19 mm
スケーリング試験	ASTM C 672 N=2 材齢 189 日にコア採取

35mmのコアについては、促進中性化試験および空隙率試験に供し、φ100mmのコアについては、アセトンを噴霧して0.05mm程度以上のひび割れの発生状況を確認し、圧縮強度試験を行った。また、φ150mmのコアは、スケーリング試験に供した。

圧縮強度試験には、コンクリート打込み時に採取した材齢7, 14, 28日のテストピースと材齢189日時点の試験体から採取したコアを用いた。促進中性化試験の促進条件は、温度20℃、相対湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度5%とし、7・14・28日間の中性化深さを測定して促進中性化速度係数を求めた。空隙率試験では、コアの表面から5mm, 7-12mm, 14-19mm部を湿式コンクリートカッターで採取して、水銀圧入式ポロシメータにより細孔容積を測定した。スケーリング試験は、-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイクルとして、50サイクルまで実施した。

### 3. 各試験結果と考察

#### 3.1 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状として、夏期の製造時におけるスランプは10.5cm、空気量は4.4%、コンクリート温度は31.2℃であった。冬期の製造時のスランプは13.0cm、空気量は4.7%、コンクリート温度は13.7℃であり、夏期、冬期ともに目標範囲内であった。

#### 3.2 脱型時の状況

全ケースともに工場の製造サイクルに合わせて材齢約18時間で脱型した。写真-1に冬-シート無の脱型時の状況を示す。写真に示すようにこのケースのみコンクリートの表面から多量の湯気が約2時間にわたって発生していることが確認された。

#### 3.3 温度履歴

図-4に夏-シート無と冬-シート無の材齢24時間までの試験体中心部の温度と環境温度を示す。夏-シート無の脱型時には、試験体の温度と環境温度の差が6℃であるのに対して、冬-シート無では38℃であった。また、脱型から2時間までの試験体中心部の平均降温速度は、夏期が0.5℃/hであったが、冬期では3.2℃/hであった。夏-シート無では、脱型時の外気温が高く、冬期に比べて大気中の飽和水蒸気量も高くなるため、試験体の湯気は確認されなかったものと推察される。

なお、図示しないものの、シート有無による試験体の温度の大きな差異は確認されなかった。シート有では、脱型後もシートがコンクリート表面に残置したことにより、水分が大気中へ逸散しないため、湯気は確認されなかったものと推察される。

ここで、脱型時から材齢24時間までの間に、試験体の表面から蒸発する水の量を熱力学に基づいて簡易的に算出し、夏期と冬期で相対比較することとした。水分の蒸

発に関する概念図を図-5に示す。コンクリート、水膜として定義した厚さ10cmの境界層および外気の3つの層で各々の水蒸気分圧の圧力勾配によって水分蒸発量を試算した。なお、水蒸気分圧はTetens(1930)のパラメータ値によるAugust他の式<sup>6)</sup>から求めた。熱伝達係数などのコンクリートの物性等は、一般的な値<sup>7)</sup>を使用した。

算出結果を図-6に示す。脱型から2時間後までの平均蒸発速度は、夏期が21.2g/m<sup>2</sup>・h、冬期が54.4g/m<sup>2</sup>・hであった。また、夏期においても冬期の3/4程度の水分が



写真-1 試験体の脱型（冬-シート無）

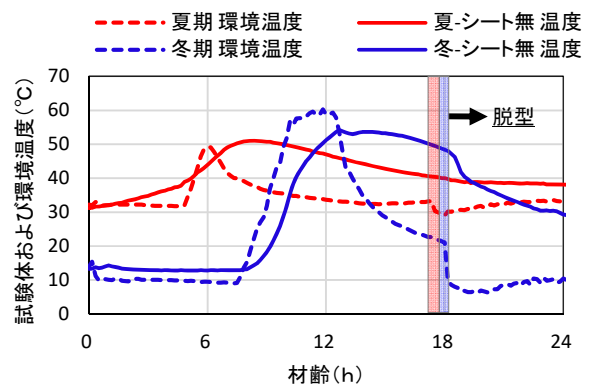


図-4 試験体の内部温度と環境温度

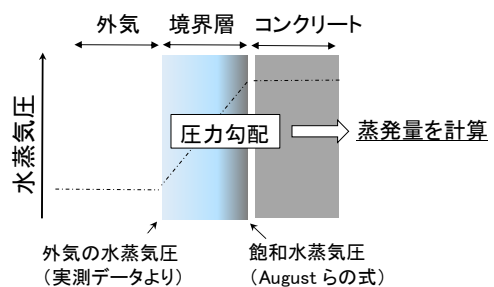


図-5 蒸発する水分量算定の概念図

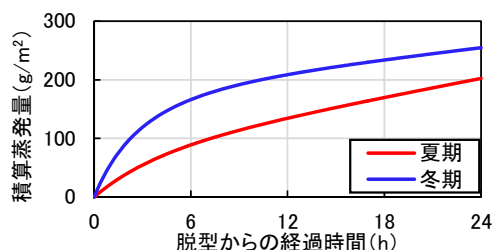


図-6 積算蒸発量

24 時間経過した時点で逸散していることが確認された。脱型時において、冬期の方が夏期に比べて、多量の水分が急速に蒸発していたことが示された。

### 3.4 圧縮強度試験

図-7 に圧縮強度の結果を示す。材齢 28 日までの材齢初期において、冬-シート無のテストピースの圧縮強度は、夏-シート無の値の 5 割から 7 割程度となっているが、材齢 189 日における冬-シート無の試験体から採取したコアの圧縮強度は、夏-シート無の値と同程度となった。なお、冬期の材齢 14 日での圧縮強度は、目標強度 35 N/mm<sup>2</sup> に達しなかった。これは本試験では、配合を同一とし製造時期の比較をするために、冬期の配合の変更を行わなかったためと考えられる。

図-8 に夏期と冬期の材齢 7・14・28・189 日の圧縮強度と積算温度の関係を示す。圧縮強度と積算温度は、高い相関性を示しており、冬期では、若材齢時の低温環境による影響で強度発現が遅延したものと推察される。

また、二次養生方法の違いによる圧縮強度は、製造時期に関わらず、シート有の方がシート無に比べてやや低くなった。これは、シートを残置させたことにより、コンクリートの含水状態が高かったことが要因として考えられる。

### 3.5 表面気泡

図-9 に表面気泡面積率を示す。製造時期に関わらず、表面気泡面積率は、シート無で 0.5~0.6% 程度、シート有で 0.1~0.2% 程度と、シート有はシート無の 1/5 程度にまで表面気泡が低減していることが確認された。これはシートが有する撥水性によって表面気泡が減少したものと考えられる<sup>8)</sup>。

### 3.6 ひび割れ

#### (1) 目視観察

試験体の脱型直後に冬-シート無の試験体の背面下部において、写真-2 に示す 0.2mm の幅のひび割れが確認された。このひび割れは、試験体中心温度が外気温と平衡した時点で 0.05 mm まで減少していたことから、主として内部拘束作用に起因して発生したものと考えられる。

一方、冬-シート有では、前述したように試験体中心の温度は、冬-シート無と同等であったが、同様の箇所でのひび割れは発生しなかった。これは、シート養生によって急激な乾燥を抑制したことと、それに伴う気化熱による表面温度の低下を低減したことで、冬-シート無に比べて、試験体表面に発生する応力が低減したものと推察される。その他のケースでは、内部拘束が主要因として考えられるひび割れは確認されなかった。

#### (2) コア表面部のひび割れ

図-10 にひび割れのトレース、図-11 にひび割れ密度を示す。ひび割れ密度は、0.05 mm 程度以上のひび割れの全

長をコア表面の面積で除して算出した。

製造時期に着目すると、冬期の方が夏期よりもひび割れ密度が大きくなっている。阿波ら<sup>9)</sup>は、蒸気養生過程における急激な温度上昇や降下によって発生する応力

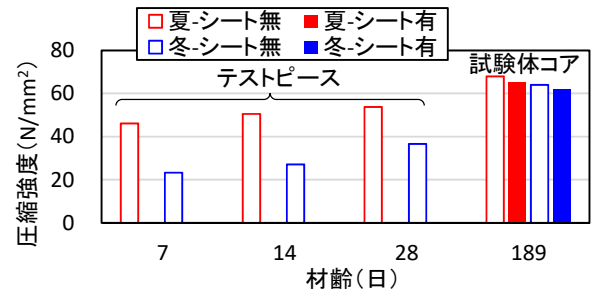


図-7 圧縮強度試験結果

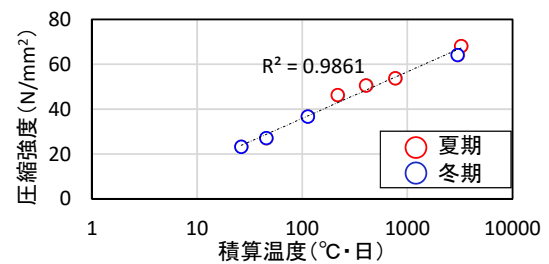


図-8 圧縮強度と積算温度の関係

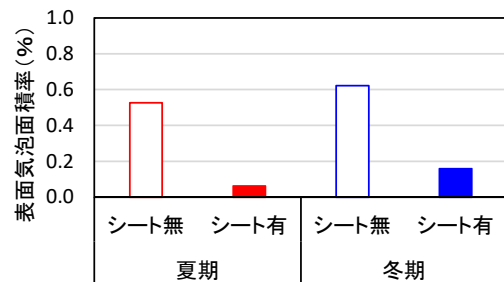


図-9 表面気泡面積率

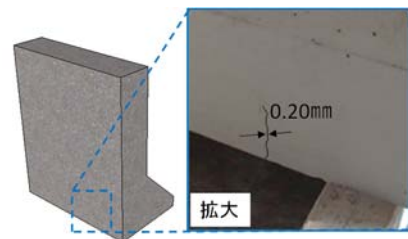


写真-2 内部拘束によるひび割れ (冬-シート無)

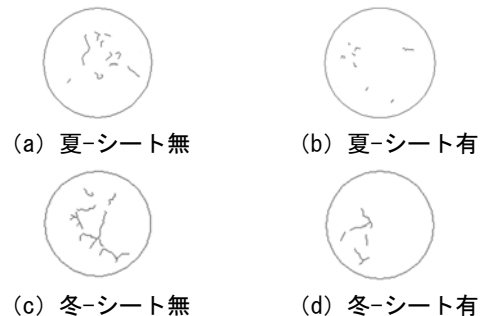


図-10 ひび割れのトレース

が、コンクリート表面部の粗骨材とモルタルの間を剥離させ、ひび割れを生じさせることを指摘している。本試験においても、前述したように脱型時の試験体の温度低下量は、冬期の方が夏期よりも大きいため、ひび割れが多く発生したものと考えられる。特に、冬-シート無では、脱型時の著しい温度低下と長期に亘る水分逸散によって、最も多くのひび割れが発生したものと考えられる。

次に、二次養生方法の違いに着目すると、シート有のひび割れ密度はそれぞれシート無の半分程度の値となった。これは、シート有はシート養生によって、表層部の乾燥を抑制し、緻密な表層部を形成したことによると考えられる。

### 3.7 非破壊試験

図-12に材齢270日に実施した透気試験の結果を示す。ここで、透気係数は含水状態の影響を受けるため、含水状態の指標となる電気抵抗率によって透気係数の評価を補正した。

夏-シート無および夏-シート有、冬-シート有の評価ランクは「良」であったが、冬-シート無では「一般」となり、他ケースと比較して透気係数が大きく、品質が低下している可能性が確認された。これは、既往の研究<sup>10)</sup>でも指摘されているように微細ひび割れの存在によって物質遮断性が低下したものと考えられる。

### 3.8 耐久性試験

#### (1) 中性化

図-13に試験結果を示す。全ケースを比較すると、促進中性化速度係数は、冬-シート無，夏-シート無，冬-シート有，夏-シート有の順で値が小さくなった。冬-シート無では、先述した透気試験結果と同様に微細ひび割れの影響により中性化が進展しやすかったものと考えられる。一方、製造時期を問わずシート有では、シート養生を施しコンクリート表層部の緻密化によって、中性化抵抗性が向上したものと考えられる。

#### (2) 空隙率

図-14に各深さにおける細孔容積を示す。二次養生方法の違いに着目すると、製造時期にかかわらずシート有は、シート無よりも、細孔容積が減少している。表面からの深さ方向に着目すると、シート無では、内部から表面にかけて細孔容積が増大していることがわかる。これに対し、シート有では表面と内部の細孔容積が概ね同程度であり、またその値は、シート無の内部の値よりも小さくなっている。さらに、各深さにおいてシートの有無を比較すると、ともに100nm以上の細孔が減少している。これは、郭ら<sup>11)</sup>も示すようにシート無では、若材齢での脱型や長期的な暴露による乾燥によって、表面ほど水和が進行しづらくなったことで、コンクリート表層ほど細孔容積が小さくならなかったものと推察される。一方、

シート有では、材齢182日まで水分逸散の抑制を図ったことで乾燥の影響を受けにくく、表面近傍においても内部と同様の水和反応が起こり、緻密な細孔構造が均質的に形成されたものと考えられる。また、既往の研究<sup>12)</sup>においては、100nm以上の空隙が物質移動に関係することが報告されており、本試験ではシート養生が物質移動抵抗性の向上に寄与することも示唆された。

製造時期の違いに着目すると、二次養生方法にかかわらず冬期の方が夏期よりも細孔容積は小さくなっている

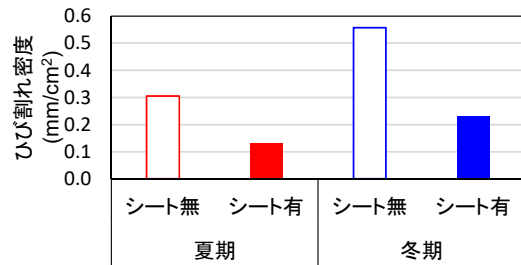


図-11 ひび割れ密度

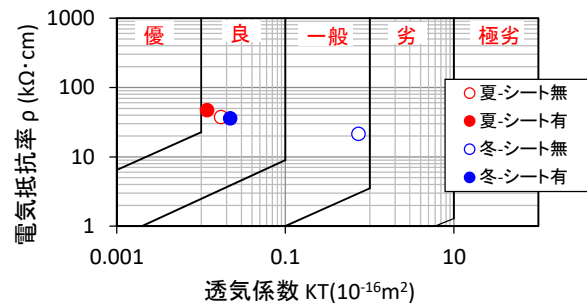


図-12 透気試験結果

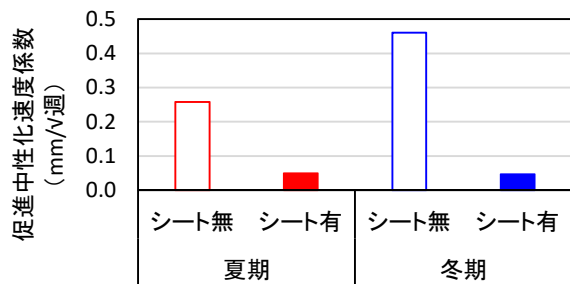


図-13 中性化速度係数

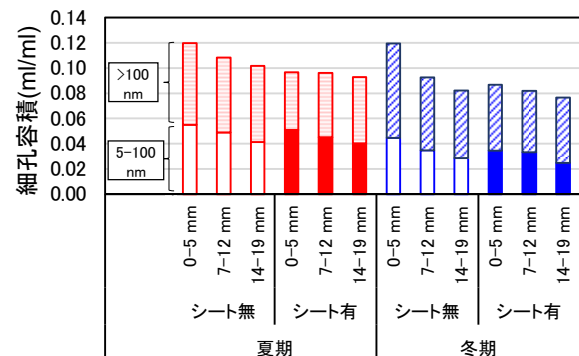


図-14 表面深さごとの細孔容積

ことがわかる。これは、前述したように冬期の若材齢では、夏期に比べ積算温度が低く、水和が徐々に進行したことで、組織が緻密化したものと推察される。

### (3) スケーリング

図-15 にスケーリング試験の結果を示す。図には、レーティング評価値「2」に相当し、現実問題として許容せざるを得ないスケーリング量と考えられている<sup>13)</sup> 0.5 kg/m<sup>2</sup> (50 サイクル時) の値も付記する。

図示するように、冬-シート無の値が最も大きく、0.5 kg/m<sup>2</sup> を 40 サイクルの段階で上回ったのに対して、その他のケースでは、50 サイクル時点においても 0.5 kg/m<sup>2</sup> を下回った。これは、冬期においては、シートを用いた二次養生による微細ひび割れの軽減、およびコンクリート表層部の緻密化の効果によって、スケーリング抵抗性が向上したものと考えられる。

なお、前述したひび割れ密度や中性化速度などにおいて、①夏-シート有、②夏-シート無、③冬-シート有、④冬-シート無の順番で品質が優れている結果となっているが、スケーリングにおいては、②夏-シート無、③冬-シート有の順番が入れ替わる結果となった。これは、冬-シート有は、夏-シート無よりもひび割れ深さが大きく、表面の剥離がしやすかったなどの可能性が考えられるが、詳細なメカニズムについては、今後の検討課題としたい。

## 4. まとめ

本検討では、PCa 工場の生産サイクルの中で製作した実規模サイズの試験体を用いた各種試験によって、製造時期や二次養生方法の違いがコンクリートの品質に及ぼす影響について検討した。得られた知見をまとめる。

- (1) 冬期の製造時、脱型時の著しい温度変化や長期的な乾燥を起因として、試験体の表面部に微細ひび割れが発生した。この微細ひび割れが、コンクリート表層部の緻密性、中性化抵抗性およびスケーリング抵抗性を低下させたと考えられる。
- (2) 冬期に製造した場合でも、二次養生としてシート養生を施すことにより、PCa 製品への微細ひび割れの発生を低減でき、さらに耐久性も確保できる。
- (3) 製造時期にかかわらず、シート養生を施して水分逸散を抑制したことにより、細孔容積が減少し、また、表面から内部にかけて均一的な細孔構造が形成され、物質移動抵抗性の向上に寄与することが示唆された。

謝辞：本研究のスケーリング試験の実施にあたり、日本大学工学部の子田康弘准教授および学生の皆様の御協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

### 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) 土木学会：コンクリートの性能に及ぼす高温作用の

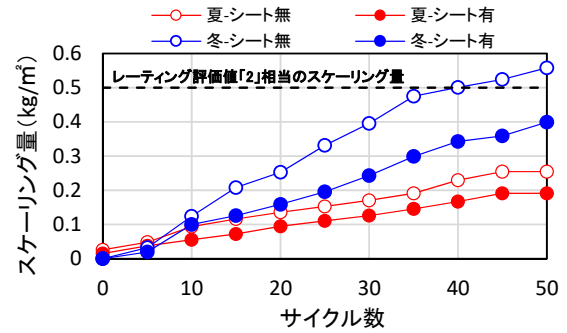


図-15 スケーリング量

影響評価研究小委員会 (352 委員会) 成果報告書，コンクリート技術シリーズ No.120, p.89, 2018

- 3) 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, pp.97-111, 1998
- 4) 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, pp.23-30, 2010
- 5) 温品達也，渡邊賢三，坂井吾郎，石田哲也：種々の結合材を用いたコンクリートに対する長期特殊シート養生の効果，vol.38, No.1, pp.747-752, 2016
- 6) Tetens, O. 1930. Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys. 6. 297-309.
- 7) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016
- 8) 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，vol.39, No.1, pp.2155-2160, 2017
- 9) 阿波稔，大塚浩司，諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひび割れ，コンクリート工学論文集，Vol.15, No.1, pp.567-572, 1993
- 10) 細田暁，林和彦，下田智也，吉田早智子：コンクリート表層のマイクロクラックが表面の吸水性と透気性に及ぼす影響，Cement Science and Concrete Technology, No.63, pp.196-203, 2009
- 11) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化，コンクリート工学論文集，Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002
- 12) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.549, pp.31-43, 1992
- 13) 月永洋一，庄谷征美，笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.8, No.1, pp.121-133, 1997