

論文 セメントの種類が蒸気養生を行ったコンクリートの強度および凍結融解抵抗性に与える影響

王 亮*1・田中 湧磨*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨: コンクリートの圧縮強度は、蒸気養生を行わない場合、水中養生期間が長くなるほど大きく増進する。これに対して、蒸気養生を行った場合は、蒸気養生後に水中養生を行っても、水中養生による強度の増進は小さい。蒸気養生を行わずに脱型後に気中養生のみを行ったコンクリートや、高温の蒸気養生を行ったコンクリートは、エントレインドエアを連行し、十分な強度を発現したのもでも、凍結融解作用による内部劣化やスケーリングに対する抵抗性が標準養生を行ったものに比べて低下することがある。

キーワード: 蒸気養生, セメントの種類, 養生温度, 水中養生期間, 圧縮強度, 凍結融解, スケーリング

1. はじめに

2015年12月に国土交通省は、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設産業育成を目指して「i-Construction委員会」を設置し、取組みを進めている。その主な取組みの一つとして、コンクリート工の規格の標準化等による全体最適の導入が掲げられている。プレキャストコンクリート製品は、施工現場でコンクリートの養生を必要としないため、工期短縮や省力化が期待される。さらに、型枠や各部材の規格を標準化し、プレキャスト化することで生産性向上を目指しており、今後、プレキャストコンクリート製品が、インフラ整備において大いに活用されることが期待されている¹⁾。一方で、既存のコンクリート構造物の老朽化が顕在化しており、限られた予算の中でインフラを維持していくため、新たに建設されるコンクリート構造物には、高い耐久性も必要とされている。

プレキャストコンクリート製品は、一般に、製造設備を整えた工場で製造されるため、天候に左右されることなく安定して施工できる。また、蒸気養生を用いることで、生産効率を高めることも可能である。既往の研究では、蒸気養生における前置不足や急激な加熱は、ひび割れの発生や粗骨材とモルタル界面の脆弱化、粗大な細孔の増加により、標準養生を行ったコンクリートより強度や耐久性が低下することが報告されている²⁾。一方で、コンクリートの前置き時間を5時間程度と長くして、蒸気養生の昇温速度も緩やかにすることで、強度および耐久性の低下を抑制できることも報告されている³⁾。また、コンクリートの練混ぜ方法の変更や脱型後に再度蒸気養生を行うなどの手法によって耐久性の向上を図ることも検討されている^{4) 5)}。

プレキャストコンクリート製品のセメントには、鉄筋コンクリート製品であれば普通ポルトランドセメントが、プレストレストコンクリート製品であれば、早強ポルトランドセメントが用いられることが多い。また、耐久性の向上や環境負荷低減を目的として、高炉セメントや高炉スラグ微粉末が用いられることもある。本研究では、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の3種類のセメントを使用し、同一水セメント比のコンクリートについて、蒸気養生時の最高温度、脱型後の水中養生の有無や水中養生期間が、圧縮強度、凍結融解抵抗性、スケーリング量に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³, ブレーン値:3,350cm²/g, 以降, OPCと記す)、早強ポルトランドセメント(密度:3.13g/cm³, ブレーン値:4,600cm²/g, 以降, HPCと記す)および高炉セメントB種(密度:3.04g/cm³, ブレーン値:3,950cm²/g, 以降, BBと記す)を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂(表乾密度:2.65g/cm³, 吸水率:1.53%, 粗粒率:2.93)を、粗骨材には、硬質砂岩碎石(最大寸法:20mm, 表乾密度:2.74g/cm³, 吸水率:0.45%, 粗粒率:6.82)を用いた。化学混和剤は、高性能減水剤およびAE剤を用いた。水セメント比は45%, 単位水量は170kg/m³, 単位粗骨材量は、1,020kg/m³で一定とした。スランプおよび空気量は、高性能減水剤およびAE剤の添加量を調整して、12±2.5cmおよび4.5±1.5%の範囲内に調整した。本実験で製造し

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科社会基盤環境学専攻 (学生会員)

*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	W/C (%)	空気量 (設計値) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤 (C×%)		
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤	AE 剤
OPC* ¹	45.0	4.5	44.0	170	378	778	1,020	0.4	0.0025
HPC* ²						777			
BB* ³						768		0.2	

*1 OPC：普通ポルトランドセメント，*2 HPC：早強ポルトランドセメント，*3 BB：高炉セメントB種

表-2 コンクリートの空気量の実測値

セメントの種類	最高温度				
	20℃	35℃	50℃	65℃	80℃
OPC	5.6%	5.8%	4.6%	4.9%	4.5%
HPC	3.3%		3.6%		4.5%
BB	3.6%		3.7%		3.6%

たコンクリートの空気量の実測値を表-2に示す。

2.2 養生方法

コンクリートは、打込み後 18 時間型枠内で養生を行ってから脱型した。蒸気養生の温度設定を図-1に示す。蒸気養生は、コンクリートを型枠内に打ち込んだ後、2 時間の前置きを行った後に 15℃/時間の速さで所定の最高温度まで昇温を行った。最高温度に到達後、所定の時間保持して、その後は、自然放冷により温度を下げた。材齢 18 時間で脱型した後、水中養生を行う供試体は、20±2℃の恒温水槽内で養生を行った。水中養生を行わない供試体および水中養生終了後の供試体は、室内で気中養生を行った。

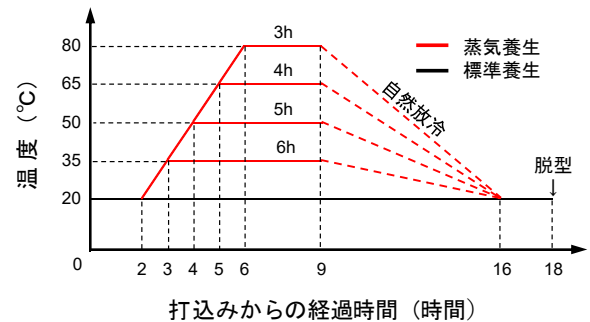
2.3 試験方法

(1) 凍結融解試験

凍結融解試験には、100×100×400mmの角柱供試体を用いて、JISA 1148：2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法（A 法）に従い試験を行った。供試体は、脱型後、試験開始まで気中養生のみを行ったものと、脱型後から材齢 7 日まで水中養生を行い、その後は試験開始まで気中養生を行ったものを使用した。試験開始時材齢は、14 日とした。

(2) スケーリング試験

スケーリング試験は、JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）」のスケーリングに対する抵抗性試験に準拠して行った。供試体は、脱型後、試験開始まで気中養生のみを行ったものと、脱型後から材齢 7 日まで水中養生を行い、その後は試験開始まで気中で養生したものを使用した。供試体は、材齢 7 日以降、100×100×400mmの角柱供試体から 100×100×100mmの供試体を切り出し、室内で表面を乾燥させた後、型枠に接していた 2 側面を残し、他の 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。



打込みからの経過時間（時間）

図-1 蒸気養生の設定

材齢 14 日より、供試体を試験容器内で、高さ 10mm のスペーサーの上に試験面を下にして置き、試験面から 5～10mm が浸漬するように、質量パーセント濃度で 3% の塩化ナトリウム水溶液を入れた。+20℃から-18℃までの凍結工程を 3 時間、-18℃の温度保持を 13 時間、-18℃から+20℃までの融解工程を 3 時間、+20℃の温度保持を 5 時間とする計 24 時間を 1 サイクルとした。14 サイクルごとに、試験面を観察するとともに、試験面より剥離したスケーリング片を、5 種 B のろ紙を用いて吸引ろ過により採取し、乾燥後、質量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 および図-3 は、それぞれ、脱型後から試験を行う材齢 28 日まで、水中および気中で養生を行ったコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度に与える蒸気養生の最高温度の影響を示したものである。セメントに OPC を用いたコンクリートでは、脱型後に水中で養生を行った場合も気中で養生を行った場合も、蒸気養生の最高温度が高くなると、圧縮強度は小さくなるのが分かる。これに対し、セメントに HPC を用いたものでは、脱型後に水中で養生を行った場合には、OPC を用いたものと同様に蒸気養生の温度が高いほど、圧縮強度は小さくなっている。一方、脱型後に気中で養生を行った場合には、蒸気養生の最高温度の影響は小さい。HPC は、OPC や BB に比べて反応が早く、外部から水が供給されない気中養生では、材齢 28 日までにコンクリート中の水分を全て消費したために、温度の影響の差が小さくなったと考え

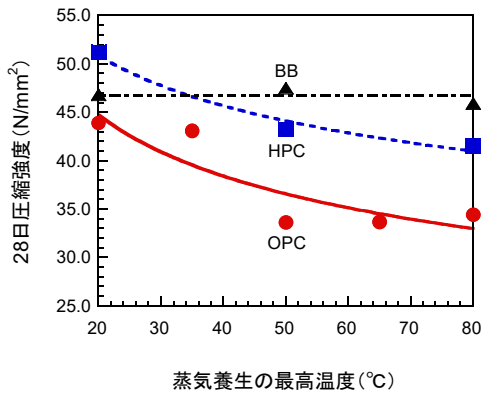


図-2 蒸気養生の最高温度が圧縮強度に与える影響
(脱型から材齢 28 日まで水中養生を行った場合)

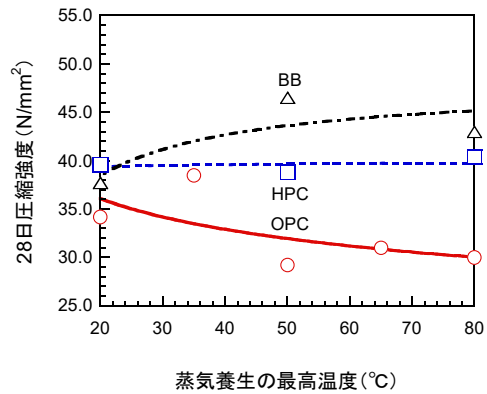


図-3 蒸気養生の最高温度が圧縮強度に与える影響
(脱型から材齢 28 日まで気中養生を行った場合)

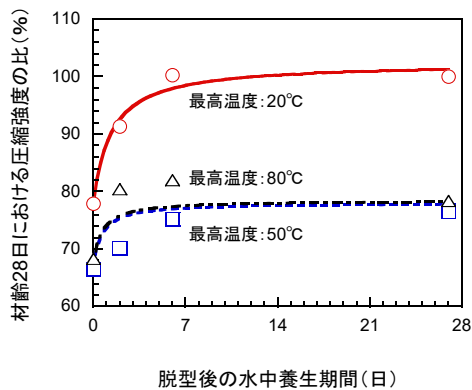


図-4 脱型後の水中養生期間が圧縮強度に与える影響
(OPC を用いた場合)

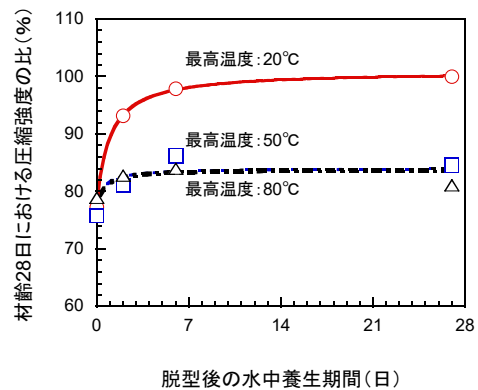


図-5 脱型後の水中養生期間が圧縮強度に与える影響
(HPC を用いた場合)

られる。BB を用いたコンクリートでは、脱型後に水中で養生を行った場合には、蒸気養生の最高温度の影響は小さい。これに対し、脱型後に気中で養生を行った場合には、蒸気養生の温度が高いほど、圧縮強度は大きくなる傾向にあり、HPC とは逆の傾向を示している。セメントの種類と脱型後の養生方法によって、蒸気養生の最高温度が圧縮強度に与える影響が異なるといえる。

図-4 は、セメントに OPC を用い、蒸気養生を行ったコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を、20°C で標準水中養生を材齢 28 日まで行ったコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度との比で表したものである。いずれの温度で養生した場合にも、蒸気養生後の水中養生を長く行うことで、圧縮強度が増進する。材齢 7 日程度まで水中養生を行えば、材齢 28 日まで水中養生を行った場合と同程度まで圧縮強度が増進する。ただし、高い温度で蒸気養生を行ったものは、水中養生を行うことによる圧縮強度の増進の効果は小さく、蒸気養生後に材齢 28 日まで水中養生を行っても、20°C で標準水中養生を行った場合に比べ、2 割程度小さい圧縮強度になる。図-5 は、セメントに HPC を用い、蒸気養生を行ったコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を、20°C で標準水中養生を材齢 28 日まで行ったコンクリートの材齢

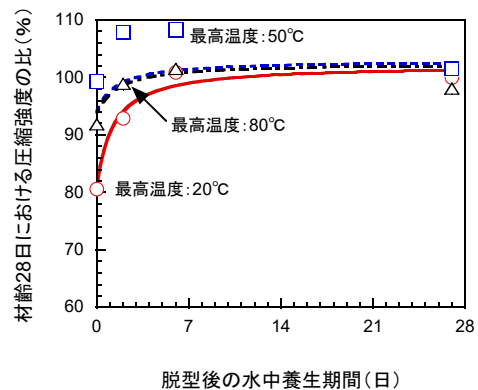


図-6 脱型後の水中養生期間が圧縮強度に与える影響
(BB を用いた場合)

28 日における圧縮強度との比で表したものである。蒸気養生を行わないものは、脱型後から水中養生を長く行うことで圧縮強度が大きく増進するのに対し、蒸気養生を行ったものは、水中養生を行っても圧縮強度の増進は小さい。OPC を用いた場合と同様に、20°C で標準水中養生を行った場合に比べ、圧縮強度は 2 割程度小さい値になる。図-6 は、セメントに BB を用いたものの結果である。OPC や HPC を用いたものと同様に、蒸気養生を行わないものは、脱型後から水中養生を長く行うことで圧縮強度が大きく増進するのに対し、蒸気養生を行ったも

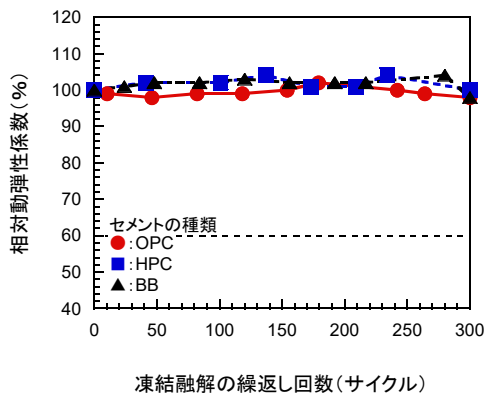


図-7 20°Cで養生したコンクリートの凍結融解抵抗性 (脱型から材齢7日まで水中養生した場合)

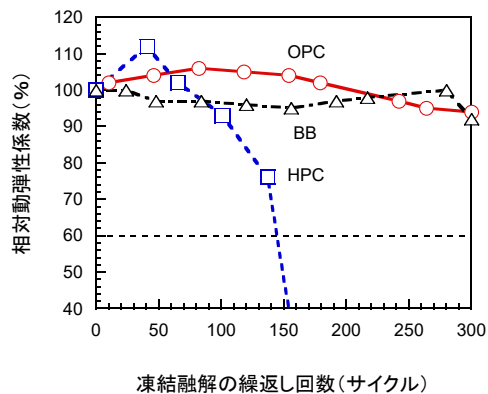


図-8 20°Cで養生したコンクリートの凍結融解抵抗性 (脱型から試験開始まで気中養生した場合)

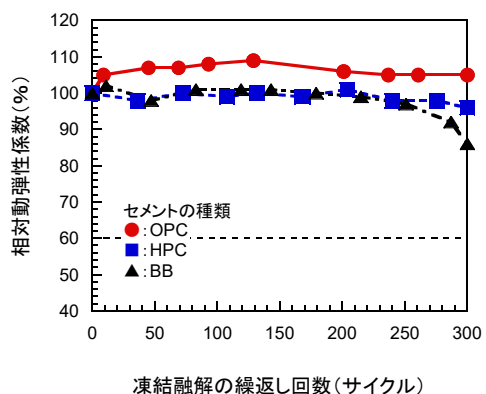


図-9 50°Cで蒸気養生したコンクリートの凍結融解抵抗性 (脱型から材齢7日まで水中で養生した場合)

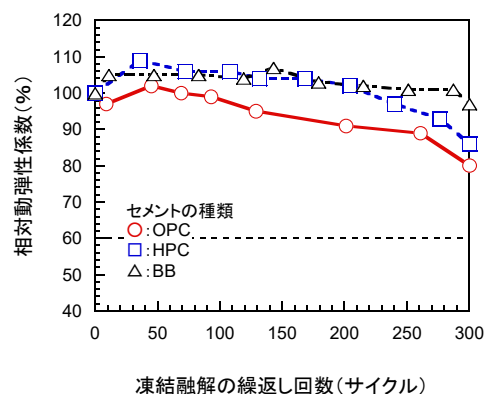


図-10 50°Cで蒸気養生したコンクリートの凍結融解抵抗性 (脱型から試験開始まで気中養生した場合)

のは、水中養生を行っても圧縮強度の増進は小さい。BBを用いたものでは、蒸気養生を行わず20°Cの気中養生のみを行ったものの圧縮強度は、蒸気養生を行ったものに比べて小さいが、材齢7日程度まで水中で養生を行うことで、圧縮強度は大きく増進する。高炉セメントの水和反応は、普通ポルトランドセメントよりも温度依存性が大きく、高い温度ほど高炉スラグの反応が活性化する⁹⁾。50°C以上で養生した場合には、高炉スラグの反応が促進されることで、脱型後の水中養生期間が強度発現に与える影響が小さいと考えられる。

以上のことから、いずれのセメントを用いた場合にも、蒸気養生を行わずに水中養生を行う場合には、水中養生期間が長くなるほど圧縮強度は大きく増進する。これに対して、蒸気養生を行うと、蒸気養生後に水中養生を行っても、水中養生による強度増進の効果は得られにくい。

3.2 凍結融解作用による内部劣化に対する抵抗性

図-7は、蒸気養生は行わず、20°Cで材齢7日まで水中で養生を行ったコンクリートの凍結融解試験の結果である。いずれのコンクリートも、脱型後から材齢7日まで水中で養生した後、試験開始まで気中養生を行い、凍結融解試験を実施した。蒸気養生は行わず、材齢7日まで水中で養生を行った場合には、いずれのセメントを用

いたものも、相対動弾性係数は低下することなく高い凍結融解抵抗性を示している。これに対し、図-8は、蒸気養生は行わず、脱型後から試験開始まで気中養生を行ったコンクリートの凍結融解試験結果である。セメントにHPCを用いた場合には、150サイクル付近で相対動弾性係数が低下している。図-3に示したように、20°Cで養生を行った場合、HPCを用いたものは、OPCやBBを用いたものと同等以上の強度を発現しているが、凍結融解抵抗性は劣っている。

図-9および図-10は、最高温度が50°Cの蒸気養生を行ったコンクリートの凍結融解試験の結果である。図-9は、蒸気養生後から材齢7日まで水中養生を行い、その後は試験開始まで気中養生を行った場合の結果で、図-10は、蒸気養生後から、試験開始まで気中養生を行った場合の結果である。最高温度が50°Cの蒸気養生を行った場合には、いずれのセメントを用いたものも、水中養生の有無にかかわらず、300サイクルの凍結融解作用後も相対動弾性係数を80%以上保持している。図-11および図-12は、最高温度が80°Cの蒸気養生を行ったコンクリートの凍結融解試験の結果である。図-11が、蒸気養生後から材齢7日まで水中養生を行い、その後は試験開始まで気中養生を行った場合の結果で、図-12が、

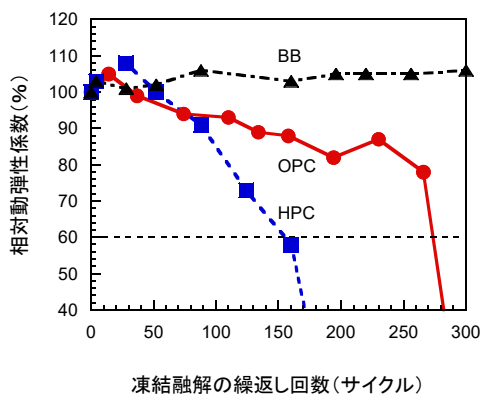


図-11 80°Cで蒸気養生したコンクリートの凍結融解抵抗性（脱型から材齢7日まで水中養生した場合）

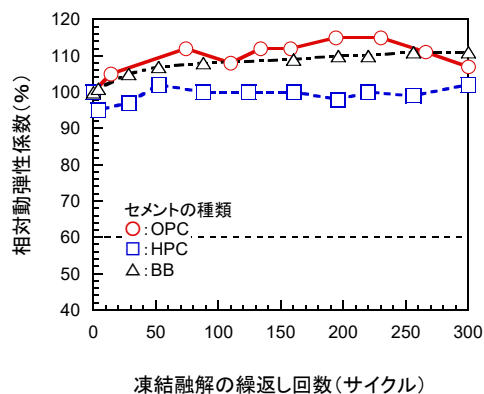


図-12 80°Cで蒸気養生したコンクリートの凍結融解抵抗性（脱型から試験開始まで気中養生した場合）

蒸気養生後から試験開始まで気中養生を行った場合の結果である。図-4 および図-5 に示されるように、80°Cで蒸気養生を行った場合にも50°Cで蒸気養生を行った場合と同程度の圧縮強度を発現しているが、OPCやHPCを用いた場合には、蒸気養生後から材齢7日まで水中養生を行ったものが、270サイクルよりも早い段階で相対動弾性係数が60%を下回っている。これに対し、BBを用いたものは、300サイクルの凍結融解作用を与えた後も相対動弾性係数が95%以上保持している。BBを用いた場合には、OPCやHPCを用いた場合に比べて、養生の影響を受けにくいことが分かる。既往の研究⁷⁾で、高炉スラグ微粉末を用いることで、AE剤を用いなくても凍結融解抵抗性が向上することが示されている。セメントにBBを用いたAEコンクリートは、蒸気養生を行った場合にも、凍結融解作用による内部劣化に対して高い抵抗性が期待できる。これに対して、OPCやHPCを用いた場合には、AEコンクリートで、十分な強度が発現していても、養生条件によっては、十分な凍結融解抵抗性が得られない場合がある。

3.3 スケーリングに対する抵抗性

図-13は、蒸気養生後から材齢7日まで水中養生を行ったコンクリートのスケーリング試験終了時の供試体表面と累積スケーリング量を示したものである。また、図-14は、蒸気養生後から試験開始まで気中養生を行ったコンクリートのスケーリング試験終了時の供試体表面と累積スケーリング量を示したものである。いずれのコンクリートも、凍結融解作用を56サイクル与えた後の結果である。セメントの種類に着目すると、OPCやHPCを用いたものに比べて、BBを用いたものの方がスケーリング量は多い傾向にある。BBを用いたものでは、蒸気養生は行わず20°Cで気中養生を行ったもののスケーリング量が、ほかと比べて多くなっている。蒸気養生を行わず20°Cの気中でのみ養生を行ったものは、セメントの水和反応が十分に進む前にコンクリート表面が乾燥するこ

とで、組織が疎になりスケーリング量が多くなったと考えられる。BBを用いたコンクリートは、凍結融解作用に対して相対動弾性係数で表す内部劣化に対する抵抗性では、養生方法に寄らず高い抵抗性を示すが、コンクリート表面のスケーリングに対しては、養生方法の影響を受けやすく、とくに、蒸気養生を行わず、さらに十分な水中養生を行わない場合には、スケーリングに対する抵抗性が低くなるといえる。

セメントにHPCを用いたものでは、80°Cの蒸気養生を行った後、材齢7日まで水中養生を行ったものと、蒸気養生は行わず20°Cの気中で養生を行ったもののスケーリング量が、ほかと比べて多くなっている。また、セメントにOPCを用いたものでは、80°Cの蒸気養生を行った後、材齢7日まで水中養生を行ったものが、スケーリング量が多くなっている。これらのコンクリートは、図-11および図-8で示した凍結融解試験においても、270サイクルよりも早い段階で相対動弾性係数が60%を下回っており、十分な凍結融解抵抗性が得られていないものである。OPCやHPCを用いたコンクリートでは、凍結融解作用に対して、相対動弾性係数で表す内部劣化に対する抵抗性が低いコンクリートは、スケーリングに対する抵抗性も低くなる傾向にある。

蒸気養生の最高温度に着目すると、いずれのセメントを用いた場合も、50°Cで養生を行ったものよりも、80°Cで養生を行ったものの方が、スケーリング量が多くなっている。高温で養生を行ったことによってセメントペーストの細孔が粗大化したこと⁸⁾や、蒸気養生でコンクリート温度が下がる際にコンクリート表面に生じる引張応力により、微細ひび割れが生じたため、スケーリング量が増加したと推察される。

4. まとめ

本研究では、3種類のセメントを用いて、蒸気養生が圧縮強度および凍結融解抵抗性に与える影響について、

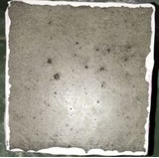
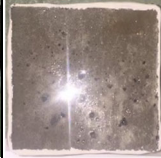

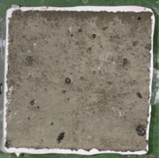
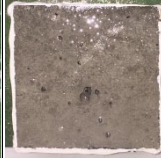
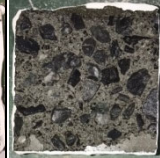
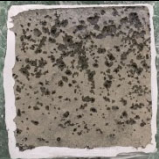

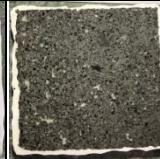
セメントの種類	最高温度		
	20℃	50℃	80℃
OPC	 15 g/m ²	 49 g/m ²	 315 g/m ²
HPC	 60 g/m ²	 10 g/m ²	 8,003 g/m ²
BB	 101 g/m ²	 393 g/m ²	 969 g/m ²

図-13 56 サイクル終了後のスケーリング量と供試体表面（脱型から材齢7日まで水中養生した場合）


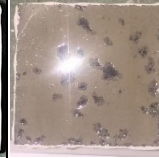
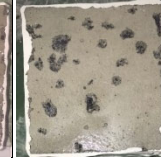
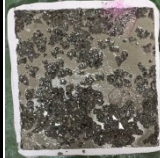



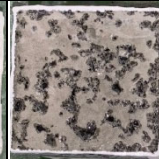
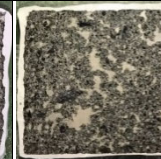
セメントの種類	最高温度		
	20℃	50℃	80℃
OPC	 38 g/m ²	 110 g/m ²	 170 g/m ²
HPC	 584 g/m ²	 19 g/m ²	 186 g/m ²
BB	 1,520 g/m ²	 354 g/m ²	 1,066 g/m ²

図-14 56 サイクル終了後のスケーリング量と供試体表面（脱型から試験開始まで気中養生した場合）

検討を行った。本実験によって得られた知見を以下に示し、本論文のまとめとする。

- (1) いずれのセメントを用いた場合にも、蒸気養生を行わずに水中養生を行う場合には、水中養生期間が長くなるほど圧縮強度は大きく増進する。これに対して、蒸気養生を行うと、蒸気養生後に水中養生を行っても、水中養生による効果は得られにくい。
- (2) セメントに OPC または HPC を用いたコンクリートは、高温の蒸気養生を行った場合や、十分な水中養生を行わなかった場合、エントレインドエアを連行し、十分な強度を発現しても、凍結融解抵抗性が低下する場合がある。これに対し、セメントに BB を用いた AE コンクリートは、養生条件に寄らず、凍結融解作用による内部劣化に対して高い抵抗性を示す。
- (3) コンクリート表面のスケーリングに対しては、養生方法の影響を受けやすく、蒸気養生を行わず気中養生のみを行った場合や、高温の蒸気養生を行った場合には、スケーリング量が多くなる。この傾向は、BB を用いた場合に顕著に表れる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，コンクリートライブラリ No. 148, 2016. 12
- 2) 住吉宏，窪山潔，今橋太一，塩谷勝：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響，セメント

技術年報，Vol. 35, pp. 290-293, 1981. 12

- 3) 丸山晃平，宇治公隆，上野敦，大野健太郎：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性及び細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 2, pp. 571-576, 2011. 6
- 4) 鈴木翔太，田澤栄一，Jariyathitipong Paweena，笠井哲郎：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. 1, pp. 355-360, 2014. 6
- 5) 佐々木優衣，宇治公隆，上野敦，原洋介：細孔構造に着目した蒸気養生コンクリートの中酸化特性及び塩化物イオン浸透性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No. 1, pp. 1483-1488, 2015. 6
- 6) 二戸信和，羽原俊介，鯉渕清，坂井悦郎：断熱温度上昇に及ぼす高炉セメントの水和反応の温度依存性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 1, pp. 59-64, 2010. 6
- 7) 綾野克紀，藤井隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol. 70, No. 4, pp. 417-427, 2014. 12
- 8) 大石幸紀，藤井隆史，綾野克紀：高温で養生したコンクリートの乾燥収縮ひずみと細孔径分布に関する研究，セメントコンクリート論文集，Vol. 71, pp. 288-294, 2018. 3