

プレキャストコンクリート部材の品質向上に関する研究

大阪支店 土木技術部 河中涼一

概要: 本研究では、プレキャストコンクリート部材の使用材料、製造方法および養生方法がコンクリートの性能に及ぼす影響に関して実験を行い、高品質なプレキャストコンクリートを製造する方法について検討を行った。ここでは蒸気養生の最高温度や水中養生の有無などの養生方法がコンクリートの性能に与える影響と、ポリプロピレン短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性が低下する可能性やその改善策について検討した内容を記す。

Key Words: PCa コンクリート, 蒸気養生, PP 短繊維

1. はじめに

コンクリート構造物の生産性向上のために、あらかじめ工場において製造されるプレキャスト(以下、PCa)コンクリート部材の活用に注目が集まっている。一般的にPCaコンクリート部材は、製造設備が整った工場において打設・仕上げ・養生等の作業が行われるため、品質が高く、安定して製造されると認識されている。しかし、コンクリートに用いる材料、製造方法および養生方法は、地域や工場によって異なり、これらの要因がコンクリートの性能に与える影響は小さくない。よって、本研究では、PCaコンクリート部材の使用材料、製造方法および養生方法がコンクリートの性能に及ぼす影響に関して実験を行い、高品質なプレキャストコンクリートを製造する方法について検討を行った。なお、本稿は岡山大学大学院綾野克紀教授・藤井隆史准教授のご指導のもと取りまとめた博士論文の一部を報告するもので、ここでは養生方法がコンクリートの性能に与える影響とポリプロピレン短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性について記す。

2. セメント種別と養生方法がコンクリートの性能に与える影響

2.1 概説

プレキャストコンクリート製品の製造工場では、生産性向上のために打込み後のコンクリート製品に蒸気養生を施す場合があるが、最高温度の設定値は製造者の経験に基づくことが多い。また、蒸気養生後、製品の出荷まで水中養生を行う場合もある。コンクリート製品に用いるセメントは、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントなど様々である。蒸気養生を行った場合、硬化後のペースト組織が疎になることが知られている^{1),2)}。本研究では、コンクリート製品の打込みから出荷までの養生条件とセメント種別の組合せがコンクリートの乾燥収縮と塩化物イオンの浸透性に及ぼす影響について検討を行った。

2.2 実験概要

2.2.1 実験概要

本研究で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15 g/cm³, ブレーン値: 3,350 cm²/g, 以降, OPCと記す), 早強ポルトランドセメント(密度: 3.13 g/cm³, ブレーン値: 4,600 cm²/g, 以降, HPCと記す)および高炉セメントB種(密度: 3.04 g/cm³, ブレーン値:



河中涼一

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

3,950 cm²/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：2.66 g/cm³，吸水率：1.53%，粗粒率：2.93）を，粗骨材には硬質砂岩砕石（最大寸法：20 mm，表乾密度：2.74 g/cm³，吸水率：0.45%，粗粒率：6.82）を用いた。水セメント比は45%，単位水量は170 kg/m³，単位粗骨材量は1,020 kg/m³で一定とした。セメントの種類の違いにより生じる体積の差は，細骨材の量を変えることで調整した。化学混和剤には高性能減水剤およびAE剤を用い，コンクリートのスランブおよび空気量が，スランブ 12±2.5 cmおよび空気量 4.5±1.5%になるよう，添加量を調整した。

2.2.2 養生方法

試験に用いたコンクリート供試体は，打込み後18時間型枠を設置した状態で養生した。型枠内で養生する間，コンクリート供試体には気温20℃の室内に静置する場合と，最高温度50℃または80℃の蒸気養生を行う場合の計3種類の温度環境を与えた。蒸気養生を行う場合は，コンクリートを型枠内に打込みから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。型枠内で養生する間の温度条件を図-1に示す。材齢18時間で脱型後，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。

2.2.3 試験方法

(1) 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみの測定には，100×100×400mmの角柱供試体を用いて，JIS A 1129-2 附属書 A(参考)に示される「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準拠して試験を行った。脱型後水中養生を行わない供試体は材齢1日で乾燥を開始し，水中養生を行う供試体は材齢7日まで水中で養生を行ってから乾燥を開始した。供試体は，乾燥開始時材齢より，温度が20±2℃，相対湿度が60±5%の恒温恒湿室内に静置した。長さ変化の測定には，ホイットモア式ひずみ計(検長：250mm，最小目盛：1/1,000mm)を用いた。

(2) 塩化物イオン浸透性試験

塩化物イオン浸透性試験は，JSCE-G 572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して行った。ただし，浸漬開始材齢は14日とし，浸漬期間は91日とした。コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定方法は，JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に規定される電位差滴定法で行った。

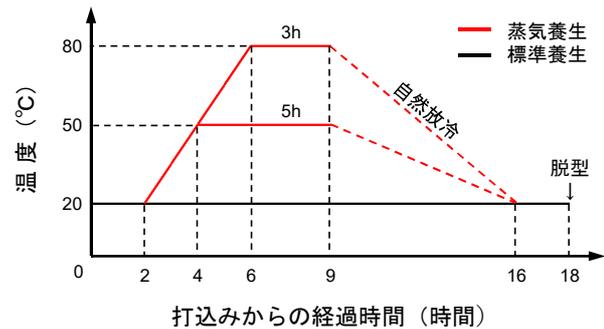


図-1 蒸気養生の温度履歴

2.3 実験結果および考察

2.3.1 養生方法が各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響

図-2 は、脱型後水中養生を行わずに材齢 1 日で乾燥を開始した OPC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。図中の○は、蒸気養生を行わずに 20℃の室内で養生を行った結果で、および△は、それぞれ、最高温度 50℃および 80℃の蒸気養生を行った結果である。また、図-3 は、脱型後から材齢 7 日まで水中養生を行ってから乾燥を開始した OPC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。図中の●は、蒸気養生を行わずに 20℃の室内で養生を行った結果で、■および▲は、それぞれ、最高温度 50℃および 80℃の蒸気養生を行ったコンクリートの結果である。水中養生の有無によらず、80℃で養生を行った

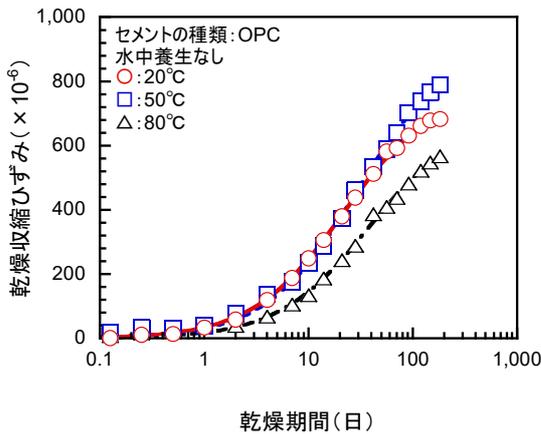


図-2 乾燥収縮の結果 (OPC : 水中養生なし)

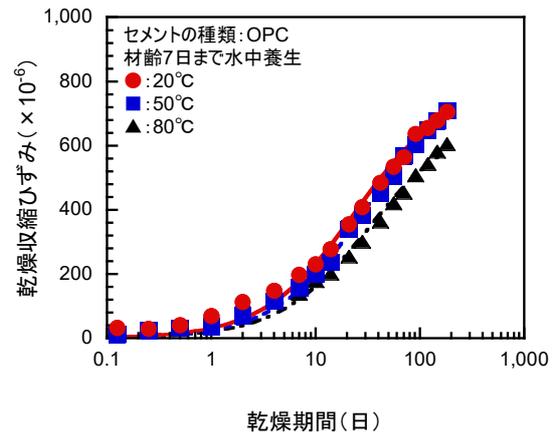


図-3 乾燥収縮の結果 (OPC : 水中養生あり)

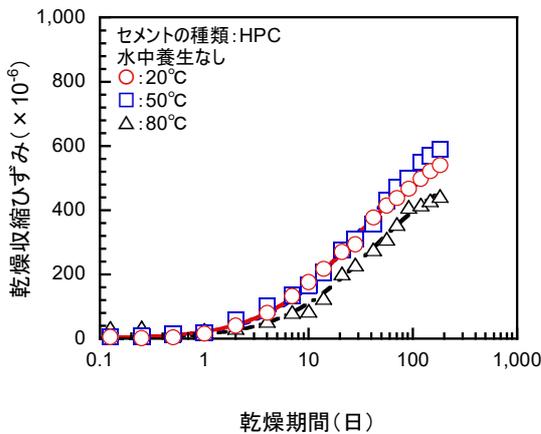


図-4 乾燥収縮の結果 (HPC : 水中養生なし)

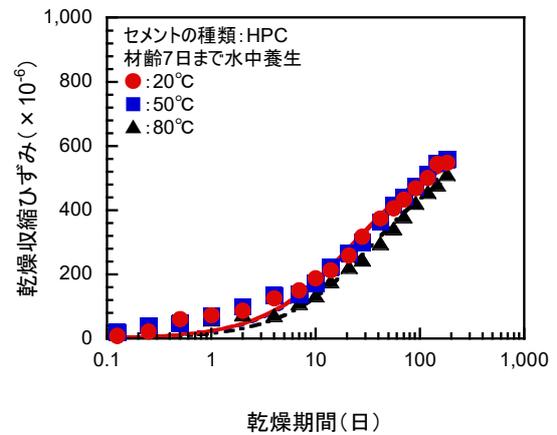


図-5 乾燥収縮の結果 (HPC : 水中養生あり)

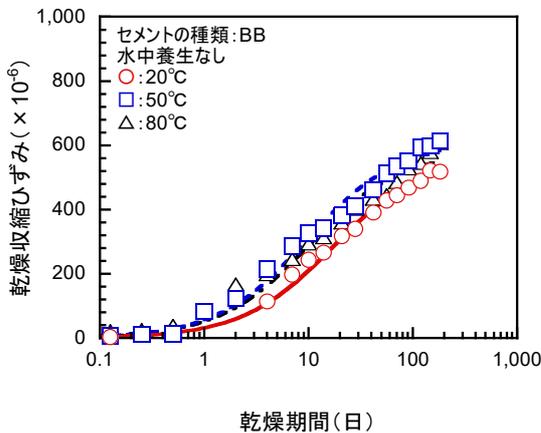


図-6 乾燥収縮の結果 (BB : 水中養生なし)

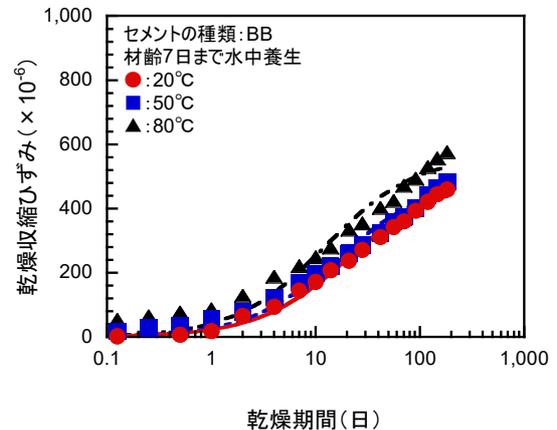


図-7 乾燥収縮の結果 (BB : 水中養生あり)

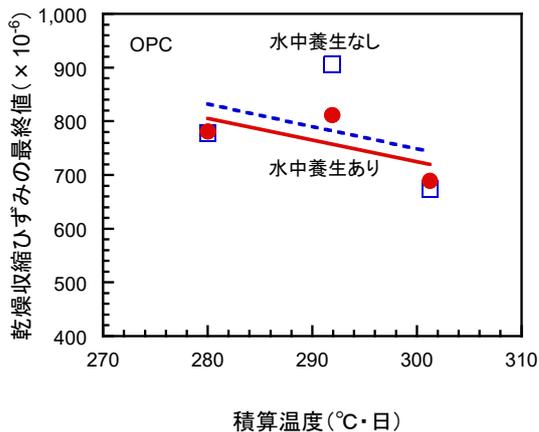


図-8 積算温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係 (OPC)

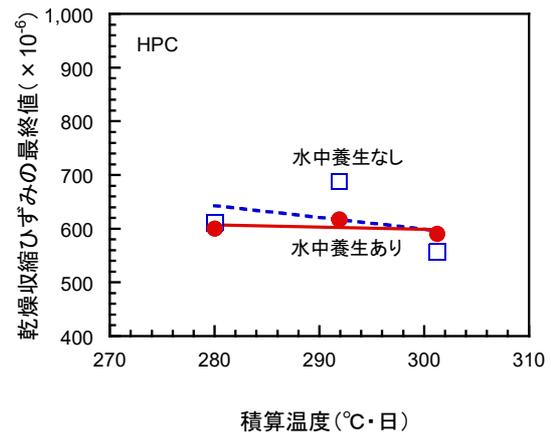


図-9 積算温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係 (HPC)

ものの乾燥収縮ひずみが小さくなっていることが分かる。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、ペーストに存在する毛細管空隙中に存在する水の毛細管張力によって生じると言われている。高温で養生を行うと、ペーストの細孔が粗大化して毛細管張力が減少するため、乾燥収縮ひずみが小さくなったと考えられる¹⁾。

図-4 は、水中養生を行わずに材齢 1 日で乾燥を開始した HPC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を、図-5 は、材齢 7 日まで水中養生を行ってから乾燥を開始した HPC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。

OPC の場合と同様に、最高温度が 80°C の蒸気養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみが最も小さくなっている。また、OPC を用いたコンクリートに比して HPC を用いたコンクリートは相対的に乾燥収縮ひずみが小さい。これは、コンクリート供試体が硬化初期に高温で養生された影響に加え、HPC の水和熱が OPC に比して高いことによって、ペーストがより疎になり、乾燥収縮ひずみが小さくなったためと推察される。

図-6 は、水中養生を行わずに材齢 1 日で乾燥を開始した BB を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を、図-7 は、材齢 7 日まで水中養生を行ってから乾燥を開始した BB を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。BB を用いたコンクリートは、OPC や HPC を用いたものに比べて、蒸気養生の最高温度が乾燥収縮ひずみに与える影響は小さいことが分かる。

図-8 は、図-2 および図-3 に示した OPC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を双曲線で回帰して求めた乾燥収縮ひずみの最終値と若材齢時の強度管理で一般的に用いられている積算温度との関係を示したものである。試験結果にばらつきはあるが、養生によって与えられる積算温度が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向にあることが分かる。図-9 および図-10 は、それぞれ、HPC および BB を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と養生時の積算温度との関係を示したものである。HPC を用いた場合には、OPC ほど顕著な差はないが、積算温度が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向にある。BB を用いた場合、養生温度の影響は、他のセメントに比べると小さいが、脱型後の水中養生を行わない場合には、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向にある。

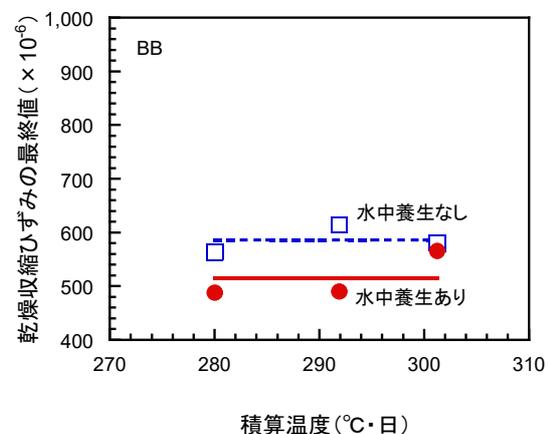


図-10 積算温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係 (BB)

2.3.2 養生方法が各種セメントを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透性に与える影響

図-11および図-12は、それぞれ、脱型後に気中養生および水中養生を行った OPC を用いたコンクリートを 91 日間塩水に浸漬させた後の塩化物イオン濃度分布を示したものである。これらの図から、高い温度で養生を行うほど、コンクリート内部の塩化物イオン濃度が大きくなっていることが分かる。高い温度で養生を行うことで、ペーストの細孔が粗大化したことにより、塩化物イオンが浸透しやすくなっている。図-13および図-14は、それぞれ、脱型後に気中養生および水中養生を行った HPC を用いたコンクリートの結果を示したものである。蒸気養生の最高温度が 80℃ の場合はコンクリート内部の塩化物イオン濃度が大きくなっている。また、図-15および図-16は、それぞれ、脱型後に気中養生および水中養生を行った BB を用いたコンク

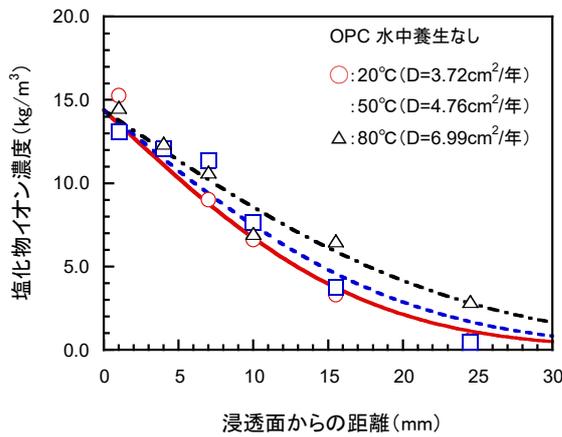


図-11 塩化物イオン分布 (OPC : 水中養生なし)

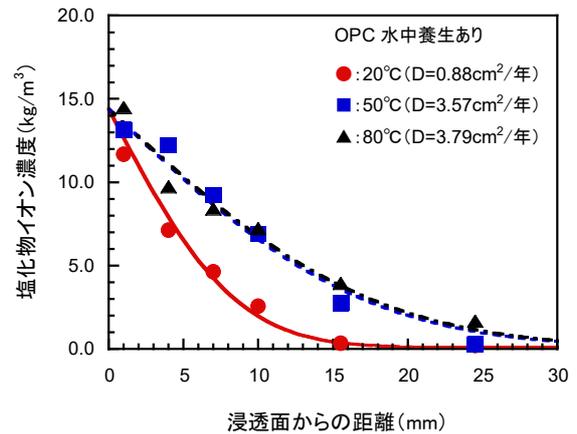


図-12 塩化物イオン分布 (OPC : 水中養生あり)

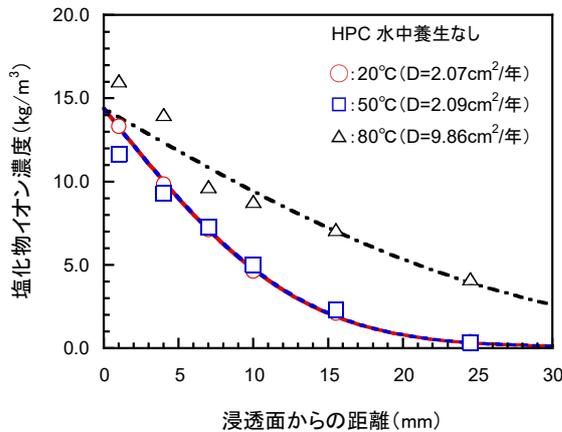


図-13 塩化物イオン分布 (HPC : 水中養生なし)

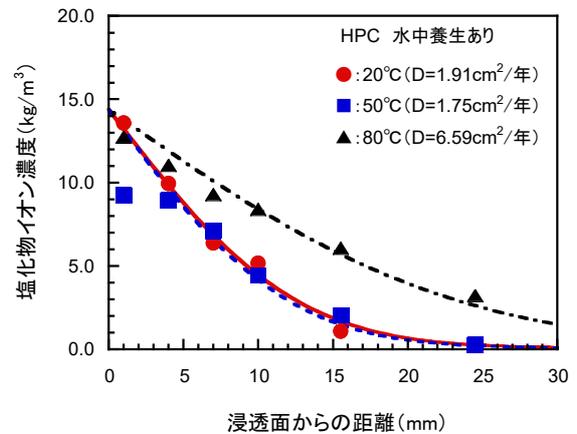


図-14 塩化物イオン分布 (HPC : 水中養生あり)

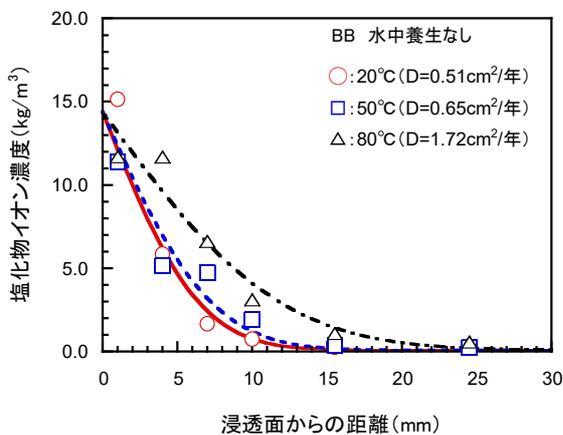


図-15 塩化物イオン分布 (BB : 水中養生なし)

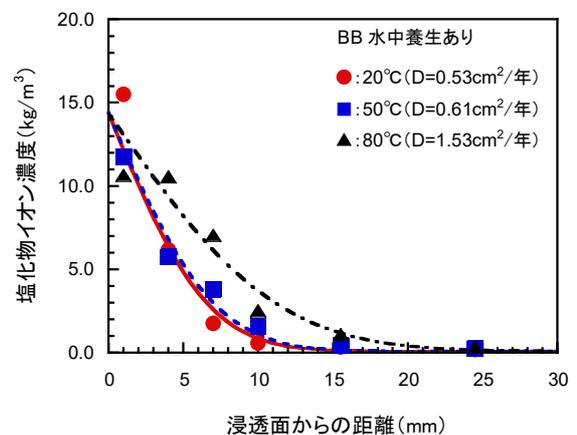


図-16 塩化物イオン分布 (BB : 水中養生あり)

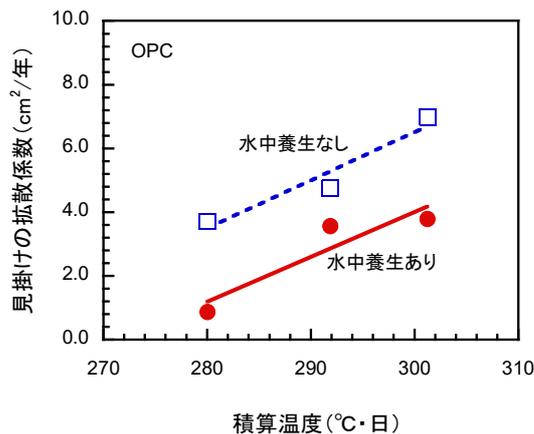


図-17 積算温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係 (OPC)

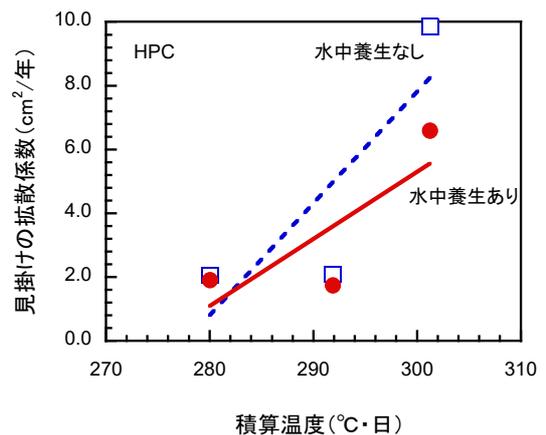


図-18 積算温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係 (HPC)

リートの結果を示したものである。BBを用いた場合、OPCを用いた場合よりも内部の塩化物イオン量は少なくなっているが、80°Cで養生した場合には、20°Cで養生した場合よりも、内部への塩化物イオンの浸透が多くなっている。

図-17は、図-11および図-12に示したOPCを用いたコンクリートの塩化物イオン濃度分布から求めた見掛けの拡散係数と養生時の積算温度との関係を示したものである。積算温度の大きい、すなわち、養生温度が高いものほど、見掛けの拡散係数が大きくなっており、80°Cで養生した場合には、20°Cで養生した場合と比較して2.2~3.5倍大きくなっている。一方で、脱型後に水中養生を行ったものは、同じ積算温度で気

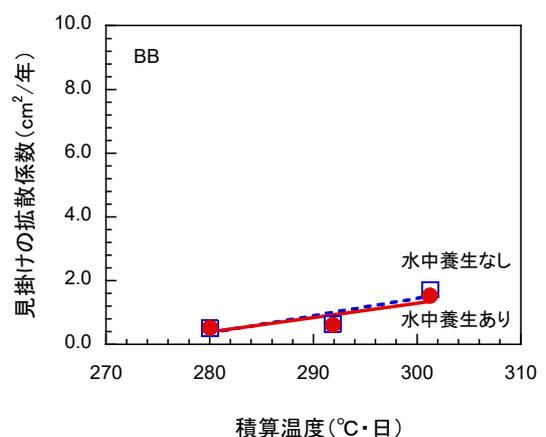


図-19 積算温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係 (BB)

中養生を行ったものよりも、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなっている。既往の研究²⁾によると、蒸気養生後に水中養生を行うことで、40nm以上の細孔量が減少することが報告されている。蒸気養生を行ったものでも、脱型後に水中養生を行うことで、塩化物イオンの浸透抵抗性が若干増加するといえる。また、図-18は、HPCを用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と養生時の積算温度との関係を示したものである。蒸気養生の最高温度が80°Cで養生した場合の拡散係数は20°Cの場合と比較して約4倍であることから、OPCよりHPCの方が、高温での養生温度の影響を受けやすいことが分かる。図-19は、BBを用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と養生時の積算温度との関係を示したものである。BBを用いた場合にも、養生温度を80°Cとした場合の見掛けの拡散係数は、20°Cの場合と比べて3倍程度に大きくなるが、OPCやHPCを用いたもの見掛けの拡散係数と比べると小さい。

2.3.3 まとめ

養生中のコンクリート温度が高く、水中養生期間が短いほど、硬化後のペーストの組織は疎になることが知られている^{1),2)}。本章では、ペーストの組織が疎になることによるコンクリートの乾燥収縮および塩化物イオン浸透性への影響を3種類のセメントを用いて実験を行った。その結果、OPCを用いたものは、組織が疎になるような養生を行った場合には、乾燥収縮は小さくなり、塩化物イオンの浸透性は大きくなる。HPCを用いたものでは、乾燥収縮に対する影響は小さいが、塩化物イオン浸透性は、OPCを用いたもの以上に大きな影響を受ける。BBを用いたものでは、乾燥収縮に対する影響は小さく、塩化物イオン浸透性もOPCを用いたものより小さい。

3. ポリプロピレン短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性

3.1 概説

我が国に存在する橋長 2m 以上の道路橋は約 73 万橋で、建設後 50 年以上経過する橋梁は現在で約 25%、2023 年には約 39%にも達する³⁾。高速自動車道路に関しては、1963 年に名神高速道路の栗東 IC-尼崎 IC 間が開通して以来、現在整備された高速道路網は約 9,000km に及んでいるが、供用から 30 年以上が経過した橋梁の延長は全体の約 40%を占める。いずれの橋梁も、建設当時より大型車交通量が増加するとともに、車両総重量も増加傾向にあり、先に述べた老朽化と相まって橋梁の劣化を顕在化させている要因である。このような背景の中、東・中・西日本高速道路株式会社が実施する大規模更新事業の一環として、高速道路橋梁の老朽化した鉄筋コンクリート床版の更新工事が行われている⁴⁾。その際、既存の鋼桁が負担する床板自重の増加を抑え、かつ橋梁建設当初よりも増加した設計荷重に耐えるために、プレストレストコンクリート(以降、PC)床版が採用される場合がある。さらに、更新工事による道路規制期間を短縮するために、PC 床版は工場等で製作されたプレキャスト(以降、PCa)製品を現場で架設する工法が採用される事例もある⁵⁾。PC 床版は、橋梁下の交差条件によってはコンクリートの剥落防止対策が求められるが、昨今では三軸アラミドメッシュシートをコンクリート表面に埋め込む方法に対し、製造工場の生産性向上のために合成短繊維を添加したコンクリート(以降、短繊維コンクリート)を適用する場合もある⁶⁾。短繊維コンクリートは従来からコンクリート構造物に多く適用されているが、既往の研究では、その凍結融解抵抗性は短繊維無添加のコンクリートと同等であるという調査結果⁷⁾が多い一方で、劣る場合があるという結果⁸⁾も報告されている。また、PC 床版のように製造工程の短縮を求められる工場製品では、早強ポルトランドセメントを採用した富配合のコンクリートを用い、蒸気養生を併用する場合が多い。しかし、これらの配合や製造方法が短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響については未知である。そこで、本研究では、ポリプロピレン(以降、PP)短繊維を添加した PCaPC 製品向けコンクリートの塩水を用いた凍結融解試験を行った。本論文では、空気量が規格値 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内でも 3.1%から 4.6%と比較的少ない場合の短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性は、短繊維を添加していないコンクリートより劣ること、その原因が短繊維によってコンクリート中に溜め込まれる余剰水に起因していると推察されること、そして凍結融解抵抗性の改善策としては増粘剤を添加することが有効であることを示す。

3.2 実験概要

3.2.1 使用材料および配合

表-2 は凍結融解試験に用いたコンクリートの配合で、PCaPC 製品の製造を想定して水セメント比などを設定したものである。表-3 はブリーディング試験に用いたコンクリートの配合で、短繊維添加の影響で生じ

表-2 凍結融解試験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)			PP 短繊維(V×%) [*]		材齢 7 日 圧縮強度 (N/mm ²)	空気量 (計測値) (%)	スランブ (計測値) (cm)
			W	C	S	G	高性能 減水剤	AE 剤 ^{**1}	増粘 剤 ^{**1}	2,000dt	30dt			
35.0	49.0	4.5	155	443	856	924	0.85	0.25	0.0	0.00	0.00	51.2	4.2	5.5
										0.50	0.00	51.5	4.1	9.5
										0.00	0.05	55.4	3.1	7.0
										0.00	0.00	55.7	3.8	20.5
										0.50	0.00	47.3	4.6	9.5
										0.00	0.05	55.8	4.2	17.5

^{*}1100 倍希釈液で使用、^{**2}外割りで添加

表-3 ブリーディング試験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)			PP 短繊維(V×%) ^{**2}		空気量 (計測値) (%)	スランブ (計測値) (cm)
			W	C	S	G	高性能 減水剤	AE 剤 ^{**1}	増粘 剤 ^{**1}	2,000dt	30dt		
45.0	44.0	4.5	170	378	774	1024	0.85	0.25	0.0	0.00	0.00	4.0	8.0
										0.50	0.00	4.0	10.0
										0.00	0.05	3.6	9.0

^{**1}1100 倍希釈液で使用、^{**2}外割りで添加

るブリーディング量の差をより明確にするために、表-2の配合よりも単位水量を増やし、水セメント比を大きくしたものである。結合材には、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)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、硬質砂岩砕石(最大寸法:20mm, 表乾密度:2.75g/cm³, 吸水率:0.45%, 粗粒率:6.86)を用いた。化学混和剤には、高性能減水剤, AE 剤およびアルキルアシルスルホン酸塩とアルキルア

ンモニウム塩の二つを主剤とした増粘剤を用いた。コンクリートの水セメント比は 35%, 単位水量は 155kg/m³とした。PP 短繊維(密度:0.91g/cm³)には写真-1 に示す繊維度が 2,000dt で長さが 30mm のものと繊維度が 30dt で長さが 12mm の 2 種類(JIS A 6208 適合品)を用い、コンクリートの体積に対して外割りで添加した。PP 短繊維は、コンクリートの練混ぜ完了後にミキサーに投入し、さらに 30 秒間攪拌した。フレッシュ時に測定したコンクリートの空気量は、いずれも 3.1%から 4.6%の範囲内である。

3.2.2 養生方法

コンクリートは、打込み後、18 時間型枠を設置した状態で蒸気養生を行った。蒸気養生は、打込み後から 4 時間まで 20±2℃で静置した後、15℃/時間の速さで 50℃まで昇温を行った。最高温度の 50℃を 4 時間保持した後、自然冷却によりコンクリート温度を下げた。脱型後は、材齢 7 日まで 20±2℃の気中で養生を行なった。凍結融解試験を開始する 6 時間前から水中で吸水させた後、試験を開始した。

3.2.3 試験方法

(1) 凍結融解試験

凍結融解試験は、100×100×400mm の角柱供試体 1 本およびφ75×150mm の円柱供試体 3 本を用いて、JIS A 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)に準拠して行った。ただし、凍結水には質量パーセント濃度 5%の塩化ナトリウム水溶液を用いている。相対動弾性係数および質量減少率の測定は、凍結融解 36 サイクルを超えない間隔で行った。なお、円柱供試体の試験結果は、3 本の平均値を用いた。

(2) 凍結融解作用後の圧縮強度試験

凍結融解を作用させた後の圧縮強度試験には、φ75×150mm の円柱供試体を用いた。供試体に凍結融解作用を 0, 50, 100, 150, 200, 250 および 300 サイクル与え、その後に圧縮強度試験を行った。円柱供試体は、凍結融解を作用させた後、端面を研磨機で平滑に仕上げ、圧縮強度試験を行った。圧縮強度は、著しい断面欠損が生じていないことを確認して全断面有効として求めた。それぞれのサイクル数毎に 3 本の供試体の圧縮強度試験を行い、その平均値を試験結果とした。

(3) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123:2012「コンクリートのブリーディング試験」に準拠して行った。容器は、内径 250mm, 内高 285mm のものを使用した。試料を容器に打ち込んだ後、バイブレーターを挿入して 20 秒間の振動を与えてコンクリートを締め固め、試料の表面を均し、気中に静置した。試料の表面を均した直後から、30 分おきにブリーディングが認められなくなるまで、コンクリート上面に浸み出した水を吸い取り、その質量を計測してブリーディング率を求めた。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 PP 短繊維の添加が凍結融解抵抗性に与える影響

図-20 は、繊維度 30dt の PP 短繊維を添加したコンクリートで作製した角柱供試体で行った凍結融解試験の相対動弾性係数の測定結果を示している。蒸気養生を行った後、材齢 7 日まで気中で養生して試験を開始した。図中の ■ はコンクリートの空気量が 3.1%の場合の結果であり、少ないサイクル数で相対動弾性係数が低下していることが分かる。一方、■ は混和剤の添加量を調整することで空気量を 6.1%まで増加させた場合の



(a) 2,000dt-30mm



(b) 30dt-12mm

写真-1 試験に用いた 2 種類の PP 短繊維

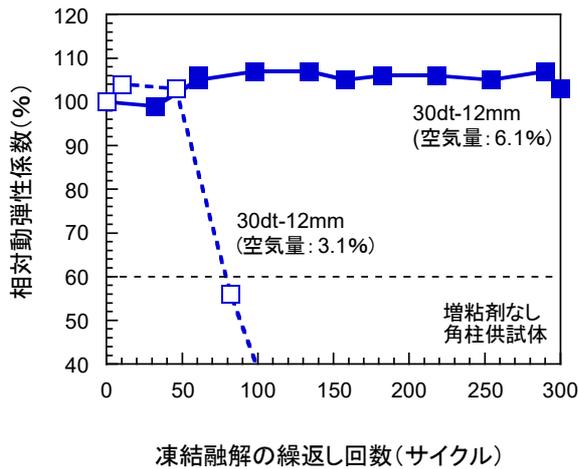


図-20 短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性に空気量が与える影響

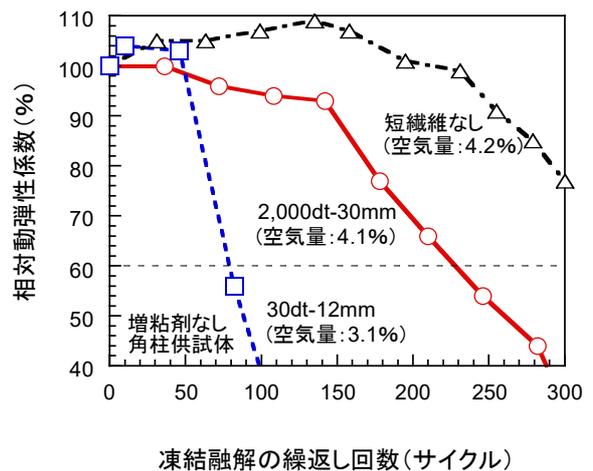


図-21 PP短繊維の添加が凍結融解抵抗性に与える影響 (角柱供試体の相対動弾性係数)

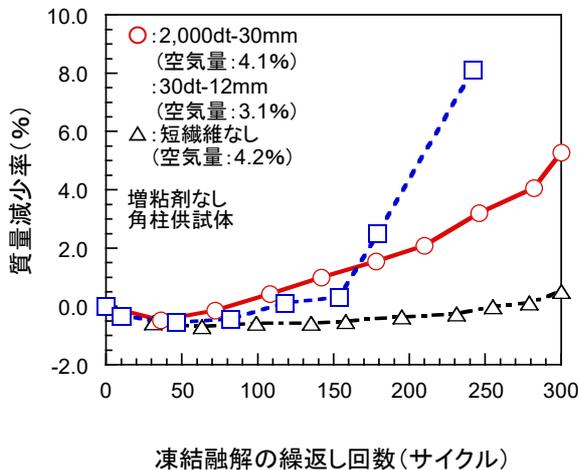


図-22 PP短繊維の凍結融解抵抗性に与える影響 (角柱供試体の質量減少率)

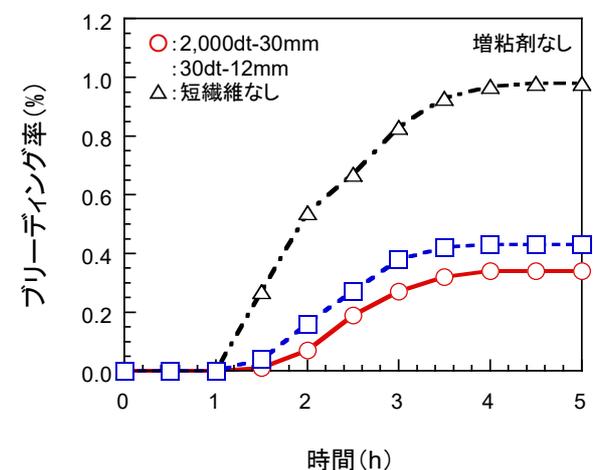
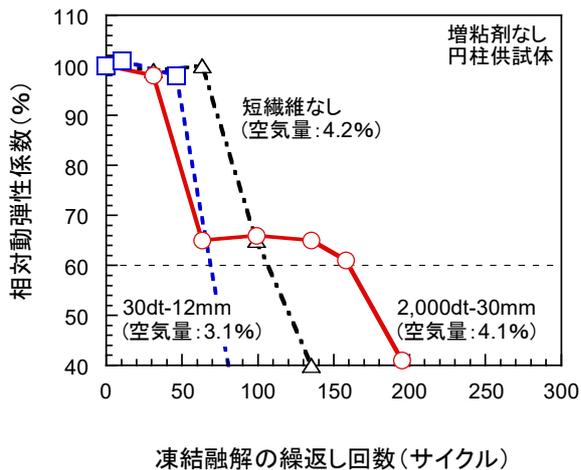


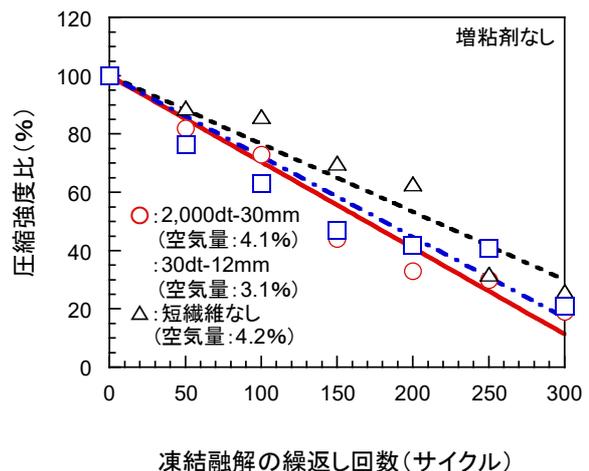
図-23 PP短繊維添加がフレッシュコンクリートのブリーディングに与える影響

結果である。十分なエントレインドエアを連行したコンクリートの凍結融解抵抗性が高いことは既知の事実であるが、PP短繊維を添加した場合にも、混和剤の添加量を調整し、空気量を多くすることで高い凍結融解抵抗性が得られることが分かる。しかし、一般的にコンクリートの空気量の規格値は $4.5 \pm 1.5\%$ で設定されることが多く、前述の空気量3.1%のコンクリートも規格内であるため、短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性には空気量が大きく影響することに留意する必要がある。後述する凍結融解試験に用いたコンクリートは、表-1および表-2に示すとおり、いずれも空気量が3.1%から4.6%で、規格の範囲内でも比較的空気量が少ない場合の試験結果である。

図-21は、PP短繊維を添加したコンクリートと短繊維を添加していないコンクリートで作製した角柱供試体を用いた凍結融解試験の相対動弾性係数の測定結果を示している。この図より、PP短繊維を添加していないコンクリートの相対動弾性係数は、300サイクル終了後も80%程度を確保できていることが分かる。一方、PP短繊維を添加した2種類のコンクリートの相対動弾性係数は、繊維度2,000dtのものが約220サイクル、30dtのものが約80サイクルで60%を下回っている。図-22は、図-21に示した角柱供試体を用いた凍結融解試験の質量減少率の測定結果を示している。供試体は試験開始まで気中で養生していたため、試験開始から50サイクル程度までの間は、供試体の吸水により質量が増加している。その後は凍結融解作用による表面劣



凍結融解の繰返し回数(サイクル)



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-24 短繊維の添加が凍結融解抵抗性に与える影響 (円柱供試体の相対動弾性係数)

図-25 PP 短繊維の添加が圧縮強度に与える影響

化で質量が減少しているが、PP 短繊維を添加した 2 種類のコンクリートの質量減少量は、短繊維を添加していないコンクリートの質量減少量よりも多くなっている。また、相対動弾性係数および質量減少量のいずれの試験結果からも、繊維度 2,000dt の PP 短繊維を添加した供試体より 30dt を添加した供試体の方が少ないサイクル数で劣化が進行していることが分かる。

図-23 は、PP 短繊維を添加したコンクリートと短繊維を添加していないコンクリートで行ったブリーディング試験の結果である。この図より、繊維度 2,000dt および 30dt の PP 短繊維を添加したコンクリートのブリーディング率は、いずれも短繊維を添加していないコンクリートの半分程度まで減少していることが分かる。このことから、PP 短繊維は、コンクリート中の余剰水がコンクリート表面へ上昇することを阻害していると推察される。また、繊維度 2,000dt の PP 短繊維の添加率は体積比 0.5% で、30dt の PP 短繊維の添加率はその 1/10 となる 0.05% であるが、本数に換算すると 30dt の PP 短繊維の方が 2,000dt より約 15 倍多い。30dt の PP 短繊維の方が添加した体積は少ないが本数が多いため、2,000dt よりも余剰水を多くコンクリート内に留めたことで双方のブリーディング率が同程度になったと考えられる。よって、PP 短繊維を添加したことによる凍結融解抵抗性低下は、短繊維の添加、配合や養生、試験条件など種々の要因が考えられるが、ブリーディングがコンクリート中に留まって弱点を形成したことが原因となった可能性がある。

図-24 は、PP 短繊維を添加したコンクリートと短繊維を添加していないコンクリートで作製した $\phi 75 \times 150 \text{mm}$ の円柱供試体を用いた凍結融解試験の相対動弾性係数の測定結果を示している。この図からも、PP 短繊維を添加した供試体の相対動弾性係数の方が、短繊維を添加していないものに比べて早期に劣化が進行していることが分かる。ただし、短繊維添加の有無や短繊維の種類による影響は図-2 に示す角柱供試体を用いた場合の試験結果よりも小さい。これは、一辺が 100mm の角柱供試体と直径 75mm の円柱供試体では断面積に約 2.3 倍の差があり、直径 75mm の円柱供試体に対しては凍結融解作用の影響がより大きかったためと推察される。

図-25 は、図-24 に示す凍結融解試験と同じ円柱供試体を用いて行った PP 短繊維を添加したコンクリートと短繊維を添加していないコンクリートの凍結融解試験を 300 サイクルまで実施する過程で、50 サイクル毎に供試体を取り出して圧縮強度を調べた結果である。圧縮強度試験には $\phi 75 \times 150 \text{mm}$ の円柱供試体を用い、3 本の平均値を求め、凍結融解を作用させる前の圧縮強度に対する比で示している。試験結果にばらつきは見られるが、いずれのコンクリートの圧縮強度も凍結融解作用の繰返しにより、ほぼ線形的に低下していることが分かる。短繊維添加の有無による圧縮強度の差は、角柱供試体の試験から得られた相対動弾性係数の差ほど大きくないが、PP 短繊維を添加した 2 種類のコンクリートの圧縮強度は、短繊維を添加していないコンクリートよりも強度の低下が大きいことが分かる。

これらの結果より、PCaPC 製品を想定して作製した本研究の供試体では、空気量が規格値 $4.5 \pm 1.5\%$ の範

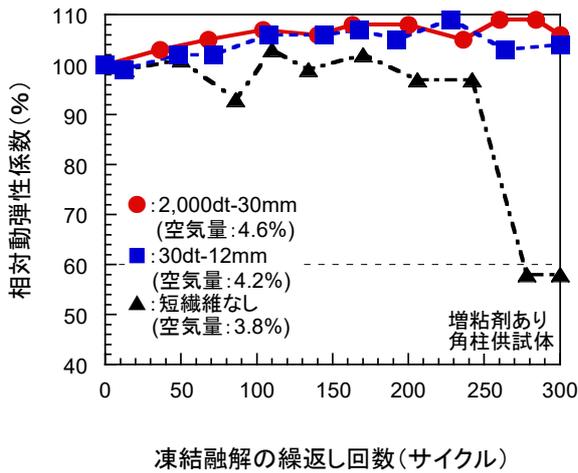


図-26 増粘剤を添加した場合の凍結融解抵抗性 (角柱供試体の相対動弾性係数)

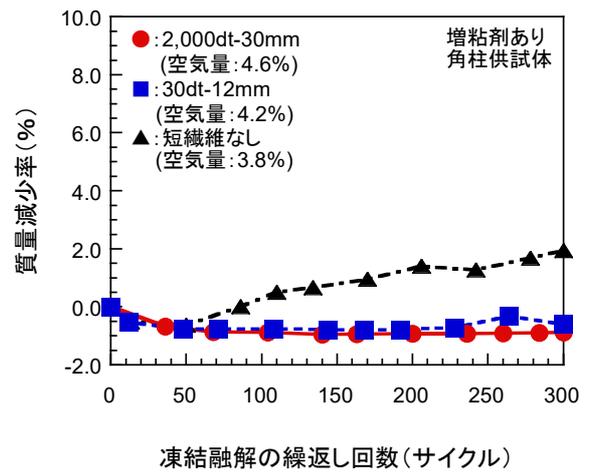


図-27 増粘剤を添加した場合の凍結融解抵抗性 (角柱供試体の質量減少率)

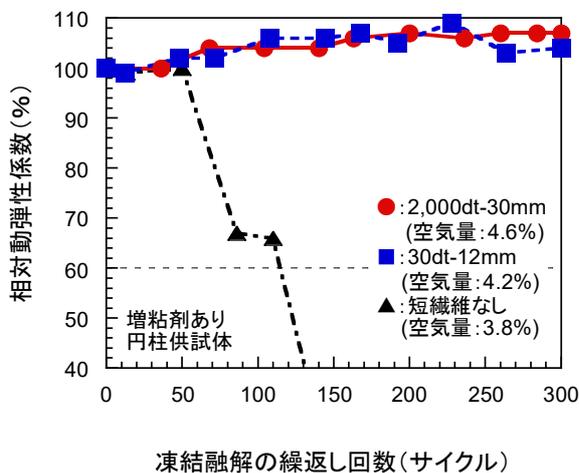


図-28 増粘剤を添加した場合の凍結融解抵抗性 (円柱供試体の相対動弾性係数)

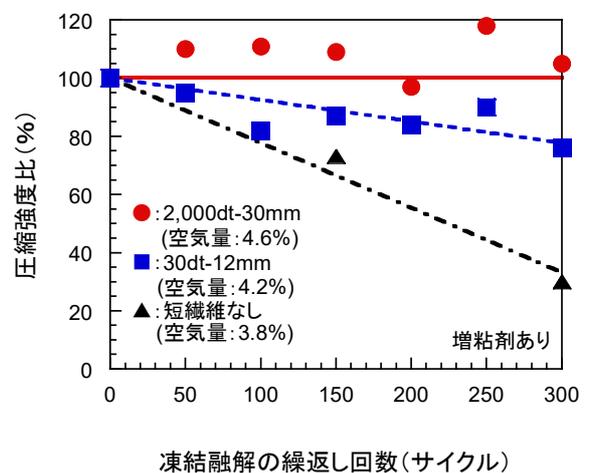


図-29 増粘剤を添加した場合の圧縮強度の推移

围内でも 3.1%から 4.6%と比較的少ない場合、PP 短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性は、短繊維を添加していないコンクリートに比して劣ることが分かる。

3.3.2 短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性改善策

図-26 は、増粘剤を添加したコンクリートで作製した角柱供試体を用いた凍結融解試験の相対動弾性係数を示している。この図より、増粘剤を添加した場合、300 サイクル終了時でも短繊維コンクリートの相対動弾性係数は低下しておらず、図-21 に示す増粘剤を添加していない場合の結果から大幅に改善していることが分かる。一方、増粘剤を添加した短繊維無添加の供試体は、300 サイクルに達する前に相対動弾性係数が 60%を下回る結となった。図-27 は、図-26 に示した増粘剤を添加したコンクリートで作製した角柱供試体の凍結融解試験によって得られた質量減少率を示している。この図からも、増粘剤を添加した場合、300 サイクル終了時でも繊維度 2,000dt および 30dt の PP 短繊維を添加した供試体の質量はほとんど減少しておらず、図-22 に示す増粘剤を添加していない場合の結果から大幅に改善していることが分かる。凍結融解抵抗性の低下が短繊維周辺に集積された余剰水に起因しているとするれば、増粘剤を添加することでブリーディング水が減少することからも、余剰水が短繊維の周辺に集積することなくコンクリート中に分散されることで凍結融解抵抗性が改善されたと推察される。一方、増粘剤を



(a) 短繊維なし



(a) 短繊維なし



(b) 2,000dt - 30mm



(b) 2,000dt - 30mm



(c) 30dt - 12mm × 284 サイクル



(c) 30dt - 12mm

写真-2 増粘剤を添加していない角柱供試体

写真-3 増粘剤を添加した角柱供試体

添加した短繊維無添加の供試体は、50 サイクル程度から線形的に質量が減少しており、増粘剤を添加していない供試体よりも少ないサイクル数で劣化していることが分かる。既往の研究でも増粘剤を添加するとコンクリートの凍結融解抵抗性は低下すると報告⁹⁾されており、本研究においても短繊維を添加していないコンクリートについては同様の結果となった。

図-28 は、増粘剤を添加したコンクリートで作製した $\phi 75 \times 150 \text{mm}$ の円柱供試体を用いた凍結融解試験の相対動弾性係数を示している。この図より、増粘剤を添加した場合、300 サイクル終了時でも繊維度 2,000dt および 30dt の PP 短繊維を添加した供試体の相対動弾性係数は低下していないことが分かる。前述のとおり、断面積の小さな円柱供試体を用いたにも関わらず、性能低下が認められなかったことから、増粘剤による凍結融解抵抗性の改善効果の高さが確認できる。一方、増粘剤を添加した短繊維無添加の供試体は、110 サイクル程度で相対動弾性係数が 60% を下回る結果となっている。

図-29 は、図-25 に示した試験と同様に、増粘剤を添加したコンクリートの円柱供試体を用いて凍結融解試験を行った場合の圧縮強度の経時変化を示している。この図より、増粘剤を添加した場合は、PP 短繊維を添加したコンクリートの圧縮強度低下は短繊維を添加していないコンクリートよりも小さいこと分かる。

写真-2 および写真-3 は、それぞれ、図-21 および図-26 に示した凍結融解試験を行った角柱供試体の試験終了時の外観を示す。これらの写真からも、短繊維無添加のコンクリートでは、増粘剤を添加した供試体の方が表面の劣化が多いのに対し、短繊維を添加したコンクリートの場合は、増粘剤を添加した供試体の方が表面の劣化が少ないことが分かる。

以上、増粘剤を添加したコンクリートは、短繊維無添加の場合、既往の研究と同様に増粘剤を添加することで凍結融解抵抗性が低下した。一方、空気量が目標値 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内でも 3.1% から 4.6% と比較的少ない短繊維コンクリートでは、増粘剤を添加することで凍結融解抵抗性が改善した。

3.3.3 まとめ

本章では、プレキャスト製品を想定したコンクリートに PP 短繊維を添加した場合の凍結融解抵抗性を評価した。実験によって得られた知見を以下に示し、本章のまとめとする。

- (1) PP 短繊維を添加したコンクリートは、空気量が規格値 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内でも、3.1% から 4.6% と比較的少ない場合、その凍結融解抵抗性は短繊維無添加のコンクリートより劣る場合がある。

- (2) PP短繊維を添加した場合、フレッシュコンクリートのブリーディング率は短繊維を添加していないコンクリートより低下する。よって、PP短繊維には余剰水をコンクリート中に留める作用があり、この余剰水が凍結融解に対する抵抗性の弱点となっている可能性がある。
- (3) 短繊維を添加していないコンクリートの凍結融解抵抗性は増粘剤を添加することで低下するが、PP短繊維を添加したコンクリートの場合、増粘剤を添加することで凍結融解抵抗性を大幅に改善される。

4. おわりに

2章の「セメント種別と養生方法がコンクリートの性能に与える影響」では、早期強度確保のために高い温度で蒸気養生を実施した場合、コンクリートの乾燥収縮は小さくなるが、塩化物イオン浸透性は大きくなることを示した。3章の「ポリプロピレン短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性」では、PP短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性は、短繊維無添加のコンクリートより劣る場合があり、その性能低下は増粘剤を添加することで改善されることを示した。いずれも生産性向上のために期待されるPCaコンクリートに関連する事項であり、本研究が工場製品の品質確保の一助となれば幸いある。

謝辞

本稿では、岡山大学大学院綾野克紀教授・藤井隆史准教授のご指導のもと取りまとめた博士論文の一部を報告させて頂きました。2017年10月から2021年3月の3年半に及ぶ博士後期課程履修の成果として執筆した博士論文は、第98代土木学会会長を務められた岡山大学名誉教授・阪田憲次先生、岡山大学大学院・綾野教授、同 藤井准教授、そして本研究を担ってくださった研究室の皆さんのご指導とご支援の賜物であります。深く感謝申し上げます。また、当社の代表取締役社長 森拓也氏、代表取締役副社長 蔵本修氏、本社土木本部顧問 小林仁氏を始め、多くの方のご支援とご理解を頂きましたこと、深く感謝申し上げます。なお、紙面の都合上、謝辞の全文は博士論文本紙末尾の記載に代えさせて頂きますが、社内外ともにご支援下さった皆様にも深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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およ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
- 3) 国土交通省編: 令和元年版国土交通白書第II部第2章第2節社会資本の老朽化対策など, p.110, 2019
- 4) 東・中・西日本高速道路(株): 東・中・西日本高速道路の更新計画について, p.8, 2015.3
- 5) (公社)プレストレストコンクリート工学会編: 更新用プレキャストPC床版技術指針, p.1, 2016
- 6) 東・中・西日本高速道路(株): 設計要領 第二集 橋梁建設編, p.11-9, 2016
- 7) 矢吹増男: コンクリート補強用ポリプロピレン繊維の剥落防止効果に関する研究, 岡山大学博士論文, pp.37-39, 2004
- 8) 吉田行, 田口史雄, 山崎勲: ポリプロピレン補強繊維コンクリートの圧縮強度および凍結融解抵抗性, 北海道開発土木研究所月報, No.608, 2004
- 9) 須藤祐司, 鮎田耕一, 佐原晴也, 竹下治之: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1003-1008, 1992