

論文 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関する研究

河中 涼一*1・田中 湧磨*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨：本研究では、凍結防止剤が散布される環境下で用いられる更新用プレキャスト道路橋床版を想定し、早強ポルトランドセメントと蒸気養生を併用するコンクリートにポリプロピレン短繊維を添加し、塩水による凍結融解試験を実施した。その結果、空気量が規格値 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内でも 3.1% から 4.6% と比較的少ない短繊維コンクリートでは、凍結融解抵抗性が低い場合があることが分かった。しかし、増粘剤を添加することで、空気量の少ない短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性を改善できることが分かった。

キーワード：ポリプロピレン短繊維、プレキャストコンクリート製品、凍結融解抵抗性、空気量、増粘剤

1. はじめに

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¹⁾。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²⁾。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³⁾。

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⁴⁾。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⁵⁾が多い一方で、劣る場合があるという結果⁶⁾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。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 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-2 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るブリーディング量の差をより明確にするために、表-1 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/cm^3 , ブレーン値: $4,600\text{cm}^2/\text{g}$)を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂(表乾密度: 2.65g/cm^3 , 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: 2.75g/cm^3 , 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リルスルホン酸塩とアルキルアンモニウム塩の二つを主

*1 (株)ピーエス三菱 大阪支店土木技術部 修(環境理工) (正会員)

*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 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×%) ^{※2}		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
									4.0	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

^{※1}100倍希釈液で使用, ^{※2}外割りで添加

表－2 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}100倍希釈液で使用, ^{※2}外割りで添加

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。

2.2 養生方法

コンクリートは, 打込み後, 18 時間型枠内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℃の空气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。

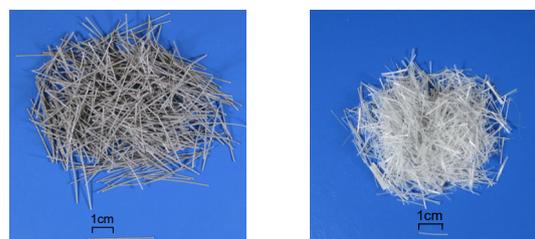
2.3 試験方法

(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



(a) 2,000dt-30mm

(b) 30dt-12mm

写真－1 試験に用いた 2 種類の PP 短繊維

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た後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. 実験結果および考察

3.1 PP 短繊維の添加が凍結融解抵抗性に与える影響

図－1 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

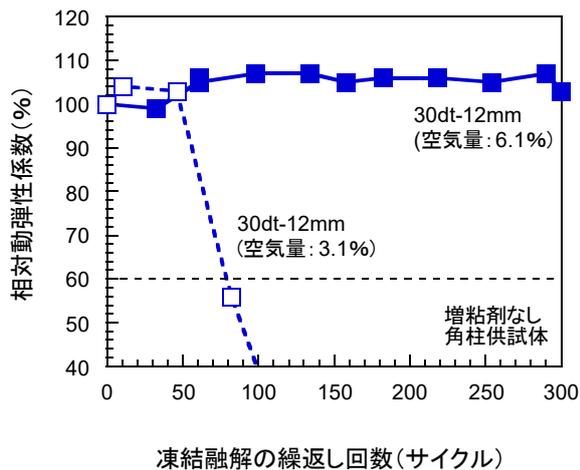


図-1 短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性に空気量を与える影響

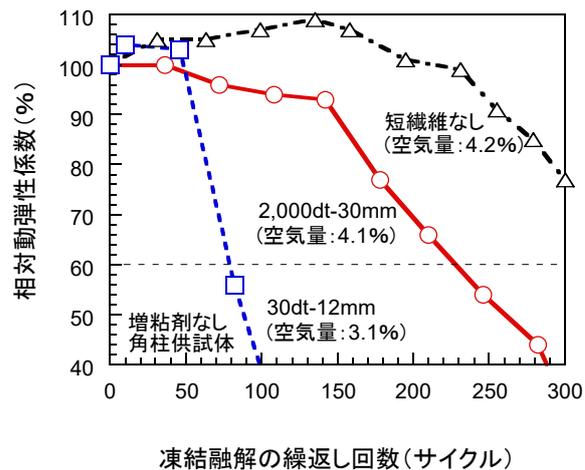


図-2 PP短繊維の添加が凍結融解抵抗性に与える影響（角柱供試体の相対動弾性係数）

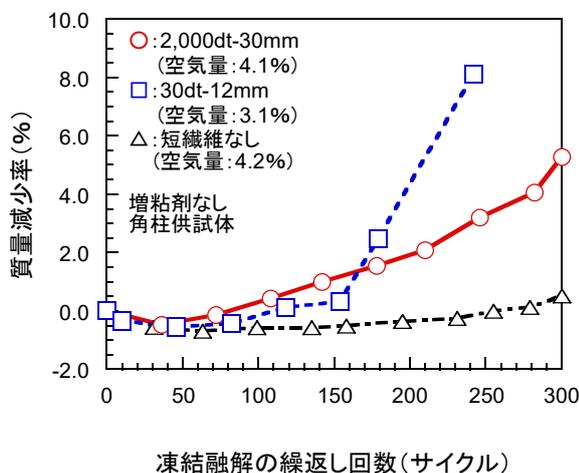


図-3 PP短繊維の凍結融解抵抗性に与える影響（角柱供試体の質量減少率）

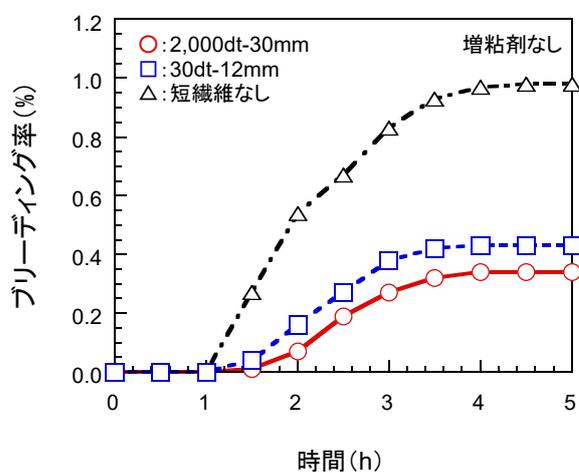
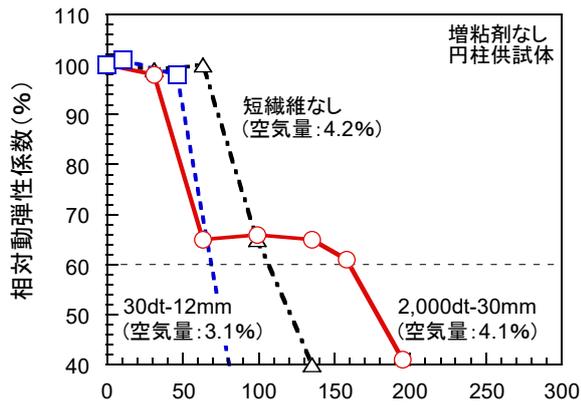


図-4 PP短繊維添加がフレッシュコンクリートのブリーディングに与える影響

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-2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-3は、図-2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



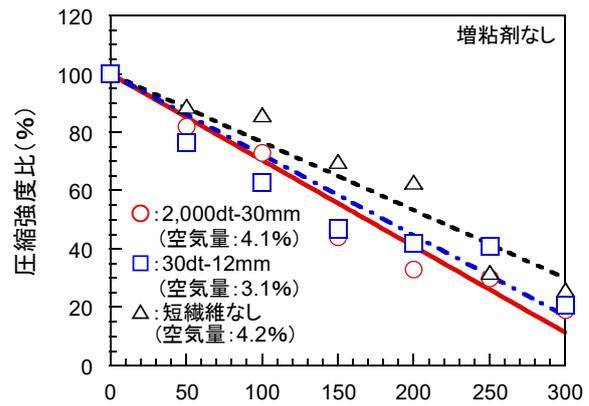
凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-5 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)

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-4 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-5 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



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-6 PP 短繊維の添加が圧縮強度に与える影響

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-6 は、図-5 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 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内でも 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。

3.2 短繊維コンクリートの凍結融解抵抗性改善策

図-7 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-2 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% を下回る結果

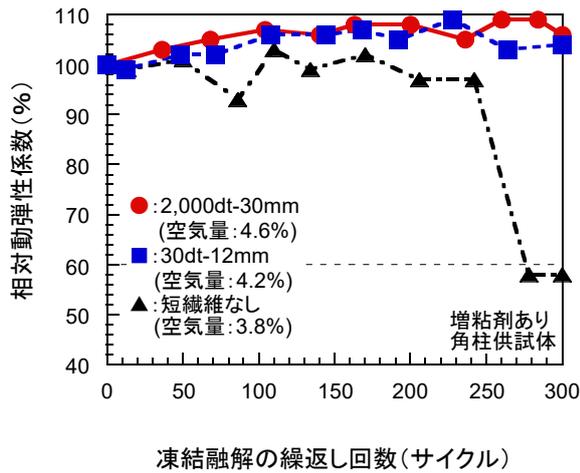


図-7 増粘剤を添加した場合の凍結融解抵抗性(角柱供試体の相対動弾性係数)

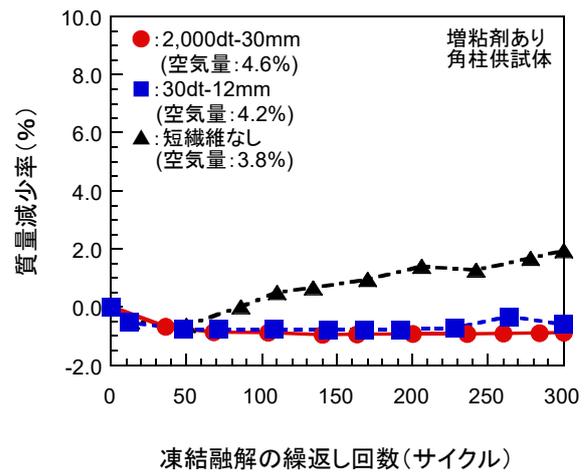


図-8 増粘剤を添加した場合の凍結融解抵抗性(角柱供試体の質量減少率)

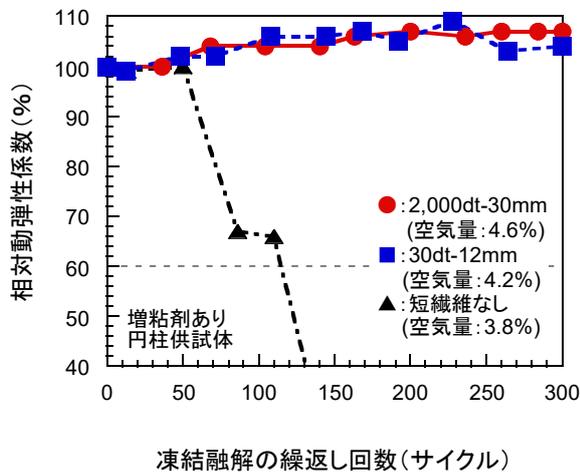


図-9 増粘剤を添加した場合の凍結融解抵抗性(円柱供試体の相対動弾性係数)

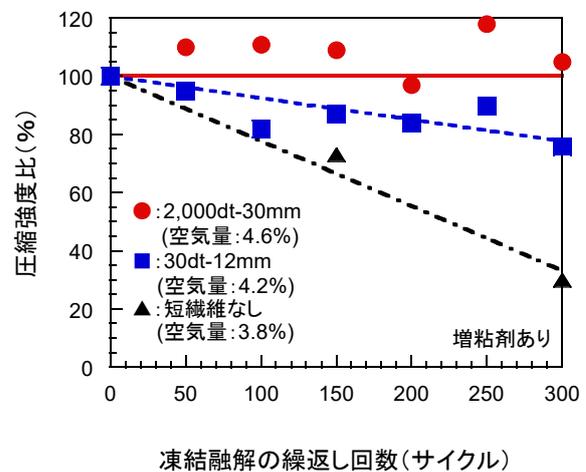


図-10 増粘剤を添加した場合の圧縮強度の推移

となった。図-8は、図-7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-3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、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⁷⁾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-9は、増粘剤を添加したコンクリートで作製したφ75×150mm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-10は、図-6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



(a) 短繊維なし



(b) 2,000dt - 30mm



(c) 30dt - 12mm ※284 サイクル

写真-3 増粘剤を添加していない角柱供試体



(a) 短繊維なし



(b) 2,000dt - 30mm



(c) 30dt - 12mm

写真-4 増粘剤を添加した角柱供試体

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-3および写真-4は、それぞれ、図-2および図-7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、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。

4. まとめ

本研究では、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、本論文のまとめを示す。

- (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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) (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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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