

論文 初期ひび割れを有する繊維補強コンクリートの凍結融解試験

内藤 英樹*1・山洞 晃一*2・古賀 秀幸*3・鈴木 基行*4

要旨：ポリプロピレン繊維を混入した繊維補強コンクリートの水中凍結融解試験を行った。初期ひび割れのない繊維補強コンクリート供試体では、300 サイクルまでの質量や動弾性係数の低下はなく、優れた凍結融解抵抗性を有することが確認された。しかし、初期ひび割れを導入した供試体では、水の凍結膨張圧によってひび割れが開口するため、凍結融解サイクル数の増加に伴ってひび割れが著しく進展するものが見られた。さらに、凍結融解サイクル数とひび割れ深さの関係を整理すると、100 サイクル程度までの凍結融解作用に対しては、ポリプロピレン繊維がコンクリートのひび割れ進展を抑制できる可能性が示唆された。

キーワード：凍結融解試験, 繊維補強コンクリート, ポリプロピレン繊維, 初期ひび割れ

1. はじめに

近年のコンクリート構造物では、AE 剤の普及によって、安全性が低下するような甚大な凍害の損傷は見られなくなった。しかし、繰り返し凍結融解作用下においてコンクリートのひび割れ部に水が供給されると、ひび割れ内部の水の凍結膨張圧によってひび割れが進展し、コンクリート片の剥落などが懸念される。著者ら¹⁾や橋口ら²⁾は、初期ひび割れを有する無筋コンクリート供試体の凍結融解試験を行っており、凍結融解抵抗性に優れたコンクリート配合であっても、ひび割れが大きく進展し、供試体が割裂する場合もあることを示した。

一方、高架橋と道路の跨道部やトンネル坑口部など、コンクリート片の剥落を回避すべき箇所に対して、ポリプロピレン繊維などを混入したコンクリート片の剥落防止対策が検討されている^{3),4)}。ポリプロピレン繊維は、コンクリート片の剥落防止を目的とした場合に、少ない繊維混入量によって衝撃に対する剥落抵抗性を大きく向上させることが可能である。しかし、ポリプロピレン繊維補強コンクリートの凍結融解試験を行った例⁵⁾は少なく、寒冷地においてポリプロピレン繊維補強コンクリートを効果的に使用するためには、その凍結融解抵抗性を把握する必要がある。

そこで、本研究では、2 種類のポリプロピレン繊維を用いた繊維補強コンクリートの凍結融解試験を行い、繊維の混入がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討する。特に、本研究では、初期欠陥のないコンクリート供試体に加えて、初期ひび割れを導入した繊維補強コンクリートを作製した。これによって、コンクリート内部に分散されるポリプロピレン繊維が、凍結融解作用に伴うひび割れ進展を抑制する効果を検証した。

2. 凍結融解試験

2.1 実験概要

供試体諸元を表-1 に示す。供試体形状は 10cm×10cm×40cm の角柱供試体とする。普通ポルトランドセメントを使用した表-2 の配合を基準として、コンクリートの練り混ぜ時に繊維 A および繊維 B のポリプロピレン繊維をミキサーに混入した。ポリプロピレン繊維の特性を表-3 に示す。繊維形状(単繊維, 網目状繊維)と繊維のアスペクト比が大きく異なる 2 種類を選定した。ポリプロピレン繊維は既往研究^{3), 4)}に示される繊維 A と繊維 B のそれぞれの標準体積混入率に対して、繊維混入率を 2 倍, 標準量, 1/2 倍, 1/4 倍に変化させた。なお、既往

表-1 供試体諸元の一覧

供試体シリーズ ^{*1}	繊維種別	繊維の体積混入率 (%)	ひび割れの有無 ^{*2}
A0	繊維 A	0.05 (標準)	なし
A2		0.10	あり
A1		0.05 (標準)	
A1/2		0.025	
A1/4		0.012	
B0	繊維 B	0.10 (標準)	なし
B2		0.20	あり
B1		0.10 (標準)	
B1/2		0.05	
B1/4		0.025	
Plane	なし	---	なし

*1 供試体はシリーズ毎に 3 体作製した。

*2 ひび割れ深さ 30mm, ひび割れ幅 0.3mm とした。

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東北新幹線建設局

*3 (株) オリエンタルコンサルタンツ 東北支店

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-2 基準コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (ml)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
53	40.6	25	148	279	755	1143	2.79	10.0	6.3

表-3 ポリプロピレン繊維の特性

	標準体積混入率 (%)	長さ (mm)	直径 (μm)	比重 (g/cm ³)	ヤング係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	繊維形状
繊維 A	0.05	12	64.8	0.91	5000	530	単繊維
繊維 B	0.10	12	300	0.91	4000	670	網目状繊維

表-4 繊維補強コンクリートの材料特性

繊維種別	体積混入率 (%)	スランプ値 (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 (MPa)	動弾性係数 (MPa)
なし	0	10.0	6.3	33.5	2.03	21800	36600
繊維 A	0.10	7.5	6.1	32.9	2.22	22100	---
	0.05	8.0	6.0	31.8	2.25	21600	35000
	0.025	8.5	6.5	31.5	2.00	21800	---
	0.013	10.5	6.1	32.1	1.82	23000	---
繊維 B	0.20	9.5	10.4	24.1	1.85	20300	---
	0.10	9.5	8.2	29.1	1.89	20000	34300
	0.05	9.0	7.0	31.3	1.83	21700	---
	0.025	9.0	7.3	30.3	1.93	20800	---

研究 3), 4) に示される標準体積混入率は、コンクリート片の剥落に着目したハンマーによる打撃試験から定めた値である。

本研究では、ポリプロピレン繊維が凍結融解作用に伴うコンクリートのひび割れ進展を抑制する効果を検討するため、初期ひび割れを導入した供試体 (以下、ひび割れ供試体) を作製した。これらの供試体は、著者ら¹⁾や橋口ら²⁾の研究を参考にして、ひび割れ深さ 30mm、ひび割れ幅 0.3mm とした。初期ひび割れの導入は、図-1 に示すように、コンクリートを打設する際にグリースを塗布したアルミ板 (幅 10cm, 厚さ 0.3mm) を供試体打設面の中央位置に垂直に埋め込み、打設の 4 時間後にアルミ板を引き抜いた¹⁾。なお、ひび割れ供試体の作製では、ひび割れ部や打設面の処理は特に行っていない。

打設後は、実構造物の施工を想定して 5 日間型枠を設置し、その後の材齢 28 日まで実験室内 (室温: 10~15°C) に気中静置した。なお、試験開始前の 3 日間は供試体を水中に静置して水を含ませ、その状態を基準として質量減少率を計測した。

凍結融解試験 (水中 A 法) では、供試体中心部の温度変

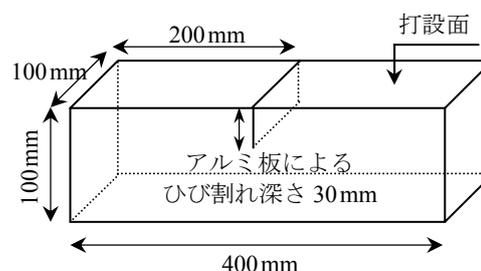


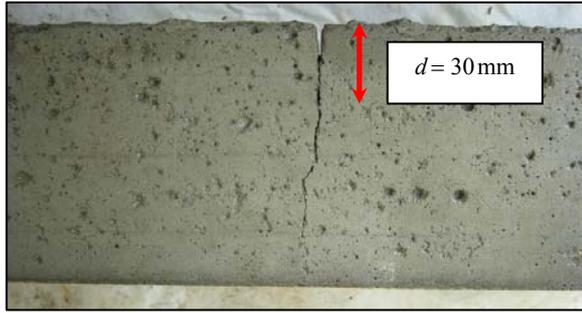
図-1 ひび割れ供試体の概略図

化-18~+5°Cを基準として、300 サイクルまでの温度履歴を与えた⁶⁾。計測は 20 サイクル毎に行った。

2.2 繊維補強コンクリートの材料特性

フレッシュコンクリートのスランプ値と空気量を表-4 に示す。繊維 A では、体積混入率 0.013 % (基準量の 1/4) のときに基準配合 (無補強コンクリート) と同程度のスランプ値を示したが、その他は繊維混入量の増加に伴ってスランプ値が低下した⁴⁾。一方、繊維 B では、繊維混入量によるスランプ値の変化はなく、基準配合と同程度のスランプ値を示した。

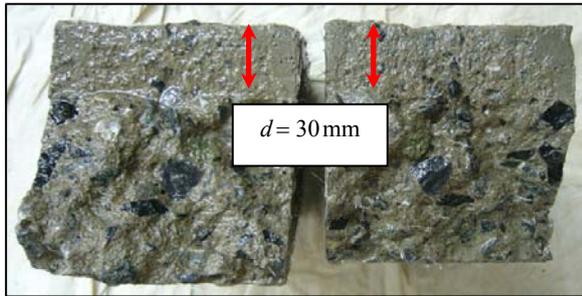
また、繊維 B では、繊維混入量の増加に伴って空気量



a) 側面のひび割れ状況 (A1/2 供試体 : 100 サイクル)



b) 割裂状況 (側面) (B2 供試体 : 198 サイクル)



c) 割裂状況 (破断面) (B2 供試体 : 198 サイクル)

写真-1 ひび割れ供試体の損傷状況

が増加した。網目状繊維は空気が付着しやすく、繊維混入量の増加とともにコンクリート中の空気量が増加したと推察される。これに対して、繊維 A (単繊維) では繊

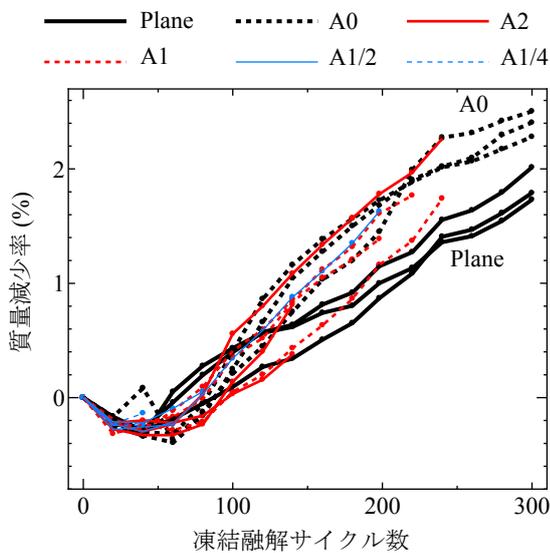
維混入量による空気量の変化はなく、基準配合と同程度の空気量を示した。

材齢 28 日の強度試験結果を表-4 に併せて示す。圧縮強度と静弾性係数は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体、引張強度 (引張割裂試験) は $\phi 10 \times 10 \text{ cm}$ の円柱供試体を用いて、それぞれ 3 体の平均値を示した。繊維 A では、圧縮強度の増減はないが⁴⁾、繊維の混入による引張強度の増加が見られた。一方、繊維 B では、引張強度の増減はないが、繊維の混入によって圧縮強度が低下した。繊維 B の圧縮強度と空気量には相関があり、特に体積混入率 0.20% (空気量 10.4%) では、圧縮強度が基準配合の 70% 程度まで低下した。なお、静弾性係数と共鳴振動試験による動弾性係数は、繊維 A と繊維 B のいずれも基準配合との大きな差異はなかった。

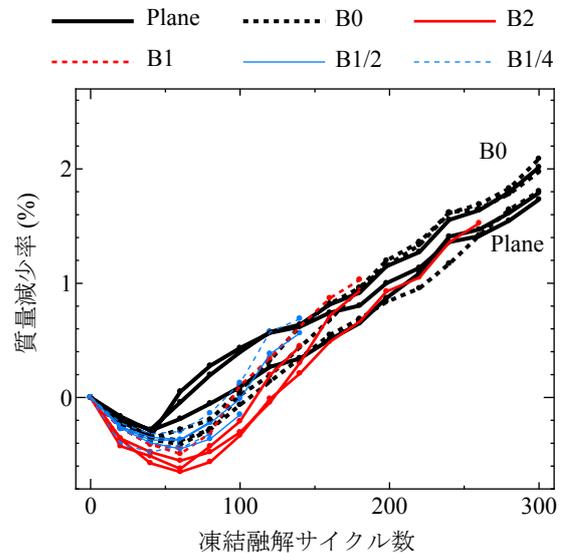
2.3 凍結融解作用による供試体の損傷状況

初期ひび割れを導入しない供試体 (Plane, A0, B0) の損傷状況に大きな違いはなく、いずれも 300 サイクル終了では供試体表面に軽微なスケーリングが生じる程度であった。初期ひび割れを有している繊維補強コンクリート供試体であるが、表面のスケーリング状況を写真-1 a), b) に示す。

一方、ひび割れ供試体では、写真-1 a) に示すように、供試体の側面から凍結融解作用に伴うひび割れの進展が目視によって確認できた。これは、ひび割れ部に満たされた水の凍結膨張圧によってひび割れ部が開いたものと推察される¹⁾。著者ら¹⁾は、繊維を混入しないコンクリートに対しても、ひび割れ供試体の凍結融解試験を行っており、これらの実験結果も写真-1 と同様に、ひび割れが大きく進展することによって供試体が割裂した。なお、既往研究¹⁾と本実験との比較では、ポリプ



(a) ポリプロピレン繊維 A



(b) ポリプロピレン繊維 B

図-2 質量減少率

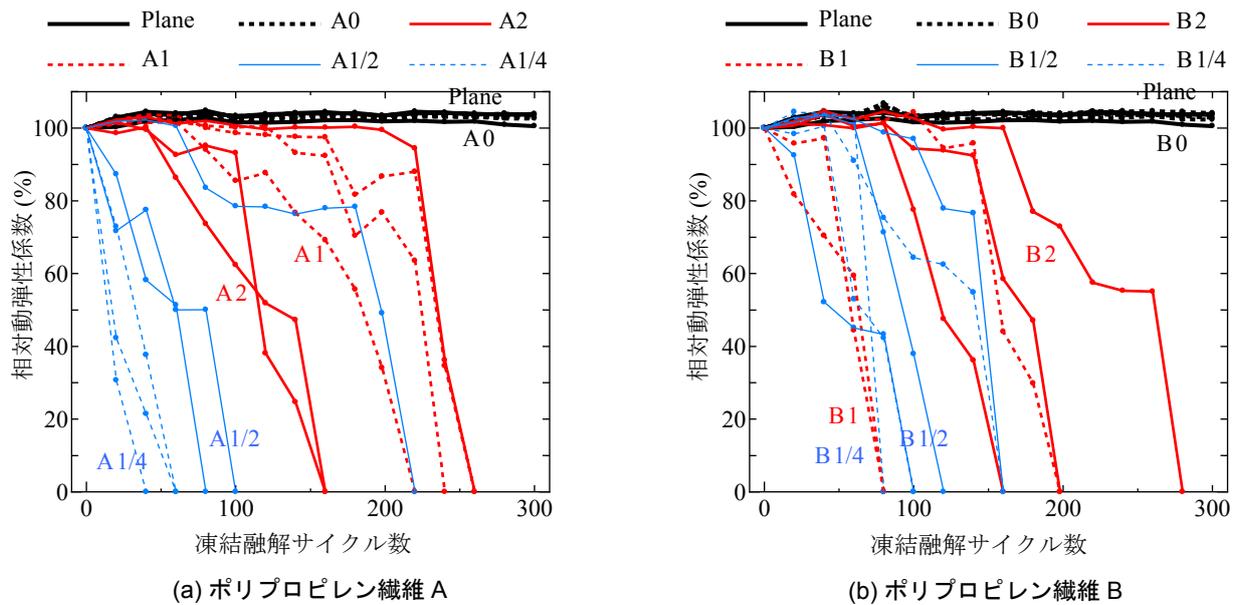


図-3 相対動弾性係数

ロピレン繊維の有無による供試体の割裂状況に大きな差異はなかった。

2.4 質量減少率

凍結融解サイクル数と質量減少率との関係を図-2に示す。繊維 A および繊維 B のいずれの繊維補強コンクリートでも、凍結融解試験開始後のわずかな水の吸収が見られた。このような水の吸収を勘案しても、繊維 A と繊維 B はいずれも 300 サイクル終了時の質量減少率が 2% 程度であり、2 種類のポリプロピレン繊維がコンクリートの質量減少率に及ぼす影響はほとんど見られなかった⁵⁾。

また、初期ひび割れの有無も供試体の質量減少率に影響を及ぼさなかった。

2.5 相対動弾性係数

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係を図-3に示す。図-3の相対動弾性係数は、通常の凍結融解試験と同様に、JIS A1127 に準拠した試験方法⁶⁾によって得られる縦振動の 1 次共鳴振動数 f (Hz) を式 (1) にそのまま代入した値である。

$$E_d = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{tb} m f^2 \quad (1)$$

ここで、 E_d は動弾性係数 (MPa)、 L は供試体長さ (mm)、 b は断面幅 (mm)、 t は断面高さ (mm)、 m は供試体質量 (kg) である。なお、本研究の供試体諸元の範囲では、駆動端子やピックアップの位置による測定値の違いがないことを確認している。

図-3より、Plane 供試体は 300 サイクルまで相対動弾性係数が低下しないことから、表-2の基準配合は凍結融解抵抗性に優れることが確認された。また、ポリプロピレン繊維を混入した A0 供試体および B0 供試体でも、

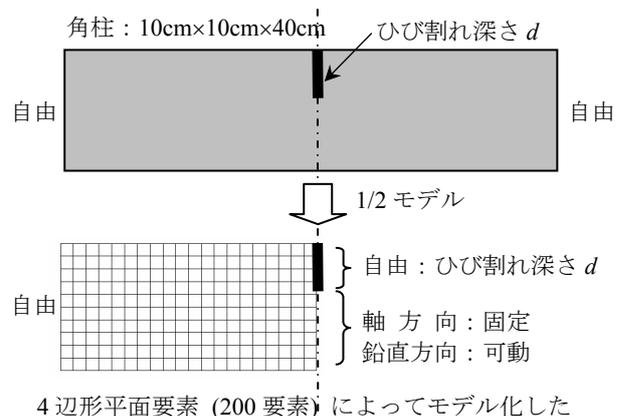


図-4 FEMによる縦振動の解析モデル

Plane 供試体と同様に、300 サイクルまで動弾性係数の低下はなく、優れた凍結融解抵抗性を有することが確認できた。なお、林ら⁵⁾の凍結融解試験の結果では、ポリプロピレン繊維の混入によってコンクリートの凍結融解抵抗性が向上することが報告されている。

しかし、このような高い凍結融解抵抗性を有する繊維補強コンクリートを使用しても、初期ひび割れを導入した供試体では、凍結融解サイクル数の増加とともに動弾性係数が大きく低下した。なお、既往研究¹⁾の検討でも同様の実験結果が得られており、同じ条件で作製した 3 体の供試体であっても、相対動弾性係数の低下が大きくばらついた。写真-1の損傷状況や図-2の質量減少率を見る限り、図-3のひび割れ供試体の相対動弾性係数の急激な低下はコンクリート材料の組織劣化に起因するものではなく、繰り返し凍結融解作用によるひび割れの進展に起因することは明らかである。

そこで、以降では凍結融解サイクル数とひび割れ深さ

との関係を整理し、ポリプロピレン繊維によるコンクリートのひび割れ抑制効果を検討する。

3. 凍結融解作用下におけるポリプロピレン繊維によるコンクリートのひび割れ抑制効果

3.1 非破壊検査によるひび割れ深さの推定

写真-1 に示されるように、供試体側面に現れるひび割れの先端は極めて小さく、目視によってひび割れ深さを計測することは困難である。凍結融解サイクル数とひび割れ深さとの関係を整理するためには、非破壊検査によるひび割れ深さ推定法が必要である。そこで、ひび割れの進展に伴って供試体の 1 次共鳴振動数 f が低下することに着目し、共鳴振動試験に基づくひび割れ深さ推定法を提示する。

式 (1) は等断面を有する棒部材を対象とした両端自由条件での振動方程式 (縦振動) の解であるが、図-4 に示すような棒部材の中心位置に深さ d のひび割れがある場合には、この振動方程式の陽な解を得ることができない。そこで、ひび割れ深さ d を 0~90mm の範囲で変化させたコンクリート供試体の 1 次共鳴振動数 (縦振動) を FEM 解析によって求めた。解析モデルの概要を図-4 に示す。10cm×10cm×40cm の角柱供試体の 1/2 領域を 8 節点平面要素 (200 要素) によってモデル化し、動弾性係数 35000MPa、コンクリート密度 2.4 g/cm³ を仮定した。図-4 に示す 1/2 モデルでは、供試体の中央を軸方向に固定とし、ひび割れの範囲は自由条件を与えた。

解析は汎用 FEM プログラム MARC を使用した。ひび割れ深さ d と FEM 解析 (固有値解析) から得られる 1 次共鳴振動数 f との関係を回帰することによって式 (2) の近似式を得た。式 (2) によるひび割れ深さ d と 1 次共鳴振動数 f との関係を図-5 に示す。

$$d = 100 - 97.161 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{3.633} \quad (2)$$

ここで、 d はひび割れ深さ (mm)、 f_0 はひび割れがない供試体 ($d=0$) の 1 次共鳴振動数 (Hz) である。なお、コンクリート密度や動弾性係数を変化させた解析結果でも、式 (2) の妥当性を確認している。ただし、式 (2) は寸法が 10cm×10cm×40cm の角柱供試体に対してのみ適用可能である。

表-1 に示すひび割れ供試体 24 体 ($d=30$ mm) に加えて、既往研究 1) のひび割れ供試体 12 体 ($d=10, 30, 50$ mm)、および式 (2) の精度検証のために別途作製したひび割れ供試体 12 体 ($d=30, 75$ mm) について、共鳴振動試験より得られる 1 次共鳴振動数 f とひび割れ深さ d との関係を図-5 に併せて示す。供試体のひび割れ幅は 0.1mm および 0.3mm である。図-5 より、式 (2) の推定式は、0.1mm のひび割れ幅に対しても、アルミ板によって導入したひ

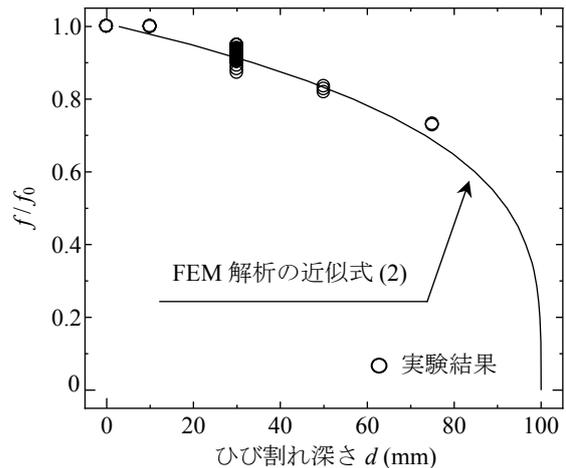


図-5 ひび割れ深さ推定式の精度検証

び割れ深さを精度良く評価することができた。

以上より、FEM 解析に基づく式 (2) を用いて、凍結融解試験による 1 次共鳴振動数 f の低下から供試体のひび割れ深さ d (供試体幅 10cm での平均値) を推定することが可能となった。特に、目視点検では判断できないコンクリート内部の大きなひび割れに対しても、提案手法によって損傷程度 (ひび割れ深さ) を推定できることは大きな利点である。

3.2 凍結融解サイクル数とひび割れ深さとの関係

凍結融解試験において 20 サイクル毎に計測した 1 次共鳴振動数 f を式 (2) に代入することによって、供試体のひび割れ深さ d を算定する。凍結融解サイクル数とひび割れ深さとの関係を図-6 に示す。なお、図-6 には、既往研究 1) に示した繊維を混入しない無補強コンクリートの実験結果も併せて示す。既往研究 1) の D4 供試体は、表-2 のコンクリート配合を使用しており、ひび割れ深さ 30mm、ひび割れ幅は 0.1mm である。また、D4 供試体は、既往研究 1) の検討において最もひび割れの進展が顕著な供試体である。

図-6 より、繊維 A では、繊維混入量の増加によってひび割れの進展が抑制される傾向が見られた。しかし、D4 供試体 (無補強コンクリート) との比較より、標準繊維混入量の 1/2 以下 (A1/2, A1/4) では、繊維によるひび割れ進展の抑制効果はほとんど見られない。また、標準混入量以上であれば 100 サイクル程度の繰り返し凍結融解作用に対してはひび割れ抑制効果が得られたが、100 サイクル以降においてひび割れが大きく進展し、割裂にいたる供試体もあった。

一方、繊維 B では、繊維混入量が標準混入量以下 (B1, B1/2, B1/4) では、40~60 サイクルまでにひび割れが進展した。D4 供試体 (無補強コンクリート) と比較しても、標準混入量以下の供試体では、繊維 B によるひび割れ抑制効果はほとんどないと判断される。しかし、繊維混入

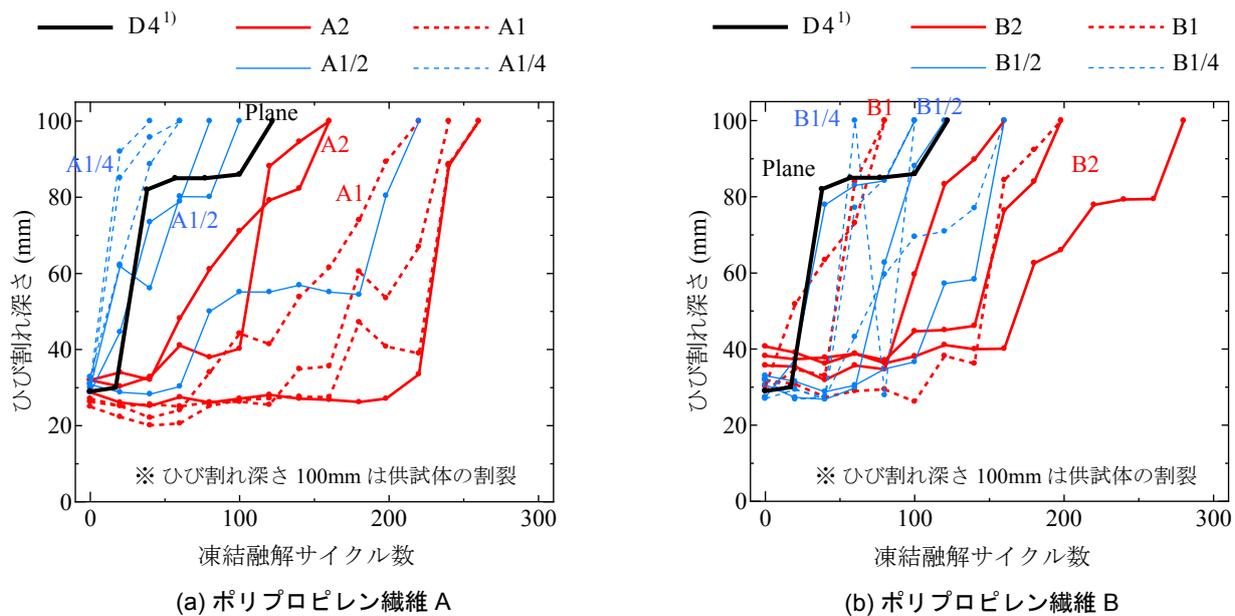


図-6 ひび割れ深さの推定

率が標準混入量の2倍以上になると、B2 供試体のように、100 サイクル程度まではひび割れの進展を抑制することができた。

以上の結果より、繊維 A では標準混入量以上、繊維 B では標準混入量の2倍以上を混入すれば、凍結融解作用 100 サイクル程度までのひび割れ抑制効果が得られる可能性が示唆された。しかし、これらの結果は、限られた諸元での検討を示したものであり、今後さらに広範な条件での凍結融解試験を行い、凍害環境下におけるポリプロピレン繊維によるコンクリートのひび割れ抑制効果を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、2種類のポリプロピレン繊維を混入した繊維補強コンクリートの凍結融解試験を行った。初期ひび割れがない場合には、2つのポリプロピレン繊維のいずれもコンクリートの凍結融解抵抗性を低下させることはなかった。初期ひび割れを導入した繊維補強コンクリート供試体では、ひび割れ内部の水の凍結膨張圧によってひび割れが大きく進展したが、繊維 A では標準混入量以上、繊維 B では標準混入量の2倍以上の繊維を混入することによって、100 サイクル程度まではコンクリートのひび割れ進展を抑制できる可能性が示された。

なお、本実験では同じ条件で作製した3体の供試体でもひび割れ進展状況が大きく異なるなど、さらに供試体数を増やした広範な供試体諸元・環境条件での検討が必要である。さらに、例え100 サイクルまでのポリプロピ

レン繊維のひび割れ抑制効果が確認できても、実構造物における有用性は不明である。今後、実構造物が晒される環境条件と凍結融解試験でのサイクル数の対応を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.915-920, 2008.7
- 2) 橋口大輔, 添田政司, 大和竹史: 初期に導入したひび割れがコンクリートの耐久性へ及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.729-734, 2004.7
- 3) 細田暁, 菅野貴浩, 石橋忠良: 合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.275-280, 2003.7
- 4) 大島章弘, 矢吹増男, 坂田昇, 古市耕輔, 平石剛紀: 連糸状ポリプロピレン繊維を用いたコンクリートの剥落防止技術の開発, 土木学会第59回年次学術講演会, 5-512, pp.1021-1022, 2004.9
- 5) 林大介, 芦澤良一, 横関康祐, 坂田昇: 有機繊維補強セメント複合材料の耐久性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1585-1590, 2005.7
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 規準編, 2005.