

細径 PP 短繊維を多混入した繊維補強コンクリートの製造方法および機能付与に関する研究

PRODUCTION METHOD AND FUNCTIONALIZATION OF FIBER REINFORCED CONCRETE USING A LOT OF SHORT POLYPROPYLENE FIBERS WITH SMALL DIAMETER

李 豪傑 (ライフサイクル工学分野)

Haojie LI

Abstract:

Fiber Reinforced Concretes (FRCs) have been considerably developed in the last decades due to the need to improve the mechanical properties of the conventional concrete. For example, by mixing the short polypropylene fibers (Short PP Fibers) with small diameter into normal concrete, enhancement of toughness and crack resistance due to shrinkage can be expected. On the other hand, dosage of the fibers is limited because the presence of Short PP Fibers with small diameter reduces the workability of concrete mixture. In this study, we proposed a production method of FRC using 1 vol.% of Short PP Fibers with small diameter. And FRC specimens using different type of Short PP fibers (small diameter and large diameter) with 1% of the total volume are designed and tested to investigate mechanical properties especially the functionalization of self-healing. As the results, it was confirmed that both sufficient fluidity and workability can be compatible by proper design of the mix proportion, the employed mixer, and the order of mixing. We also confirmed that it was possible to realize the improvement of bending toughness and the prevention of rapid stress reduction after initial crack occurrence. Furthermore, it was confirmed that the promotion of self-healing in the micro cracked zone can be realized by increasing the ratio of Short PP Fibers with small diameter.

Keywords: Short PP fiber with small diameter, Crack, Self-healing, Mechanical Property, Fresh Property, Drying Shrinkage Behavior

細径 PP 短繊維, ひび割れ, 自己修復, 機械的性質, フレッシュ性状, 乾燥収縮性状

1. はじめに

これまで、繊維補強セメント複合材料 (FRCC) の研究・開発が盛んに行われてきた。例えば、高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC) は曲げ応力下でのたわみ硬化挙動を示し¹⁾、高性能繊維補強セメント複合材料 (HPRFRC) は引張応力下でのひずみ硬化挙動を示す²⁾。また、ひび割れの自己修復を促進させることができるといった報告もされている³⁾。これらの材料は、粗骨材を用いないモルタルをベースとし、補強繊維を体積比で 2% (2 vol.%) 超混入する検討事例が多い⁴⁾。この場合、引張応力下における脆性的破壊というコンクリートの欠点を補えるものの、単位セメント量が 1000 kg/m³ 超となる場合もあり、CO₂ 排出量など環境負荷が大きいことは否めない。一方、粗骨材を用いる通常のコンクリートに対して繊維補強を行った繊維補強コンクリート (FRC) についても、これまで膨大な検討が行われている。例えば、ポリプロピレン短繊維 (PP 短繊維) は、剥落防止機能の付与⁵⁾、収縮ひび割れに対する抵抗性の向上⁶⁾等、多岐に亘る用途で使用されている。ただし、繊度が 500 dtex より小さい細径繊維の場合は、著しい流動性の低下を招くため、施工上の制限により混入量は 0.2 vol.% 程度に限定されるものが大部分である。このように、通常のコンクリートに対しても、FRCC と同様に補強繊維を多混入することができれば、環境負荷の過度な増大にせず力学特性や収縮ひび割れに対する抵抗性の改善、また、自己修復等の機能付与が期待される。

上記を背景に、本検討ではまず、一般的に繊維補強に用いられる PP 短繊維よりも直径が小さく、また、自己修復機能

の付与に効果が確認されている細径 PP 短繊維⁷⁾を取り上げ、コンクリートに 1.00 vol.% まで混入してもワーカビリティの確保が可能な調査設計と製造方法について検討した。その結果、単位水量を 275 kg/m³、水セメント比 (W/C) を 40%、細骨材率 (s/a) を 45% と設定し、繊維の投入順序および練混ぜミキサを工夫することで、十分なワーカビリティの確保が可能であることを確認した。ここでは、この検討結果を踏まえ、また、サイズの異なる補強繊維の組み合わせによる多段階の繊維補強効果⁸⁾によって太径 PP 短繊維を対象に加え、2 種類の径を持つ PP 短繊維を合計 1.00 vol.% になるように両者の割合を変えた試験体を製作して実験を行い、FRC の各種材料特性や自己修復性状、および、短繊維の混入割合が及ぼす影響について考察を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

表-1 に使用材料を、表-2 に繊維物性を示す。細骨材については、陸砂と砕砂の二種類を 1 対 1 で混合して粒度調整を行ったものを使用した。調合については前述のように、単位水量を 275 kg/m³、W/C を 40%、s/a を 45% と固定し、繊維の混入率が合計 1.00 vol.% になるように細径 PP 短繊維 (F_S) および太径 PP 短繊維 (F_L) の混入率を定めて調合を決定した。表-3 に調合表を示す。

2.2 練混ぜ方法

本検討で用いる F_S は表面に吸着される水分量が大きいいため、練混ぜの開始の時点で繊維を予め水分中に分散させることにより、その後の練混ぜに必要な水分を確保することとし

た。そのため、練混ぜ方法としてまずはセメント、および、減水剤を添加・攪拌しておいた水を投入して1分間の練混ぜを行い、続いてセメントペーストに繊維を投入して2分間で練り混ぜた。最後に細骨材と粗骨材を投入して2分間の練混ぜを行い、合計5分間の練混ぜ時間とした。また、すべての練混ぜは材料の速度や方向等を変化させ不規則な揺動を与えられる揺動式ミキサ（容量30L）を使用し、練り混ぜ量は1バッチあたり28Lとした。

2.3 試験体概要

本検討では、練り上がったフレッシュコンクリートをそれぞれ角柱型枠と円柱型枠に投入して2種類の試験体を製作した。表-4に試験体概要を示す。

2.4 試験方法

2.4.1 フレッシュ試験

練り上がったフレッシュコンクリートに対してスランプ試験（JIS A 1101）および圧力法による空気量測定（JIS A 1128）のフレッシュ試験を行った。

2.4.2 乾燥収縮試験

JASS 5に規定される試験条件に従い、材齢7日までの水中養生を完了した試験体を20°C-60%RHの環境下において静置し、長さおよび質量の測定を行い、それぞれの経時変化を得た。

2.4.3 強度試験

強度試験は、材齢28日までの水中養生を完了した試験体に対し、1000kN万能試験機を用いて実施した。圧縮試験時にはコンプレッションメータを用いてひずみを計測し、圧縮強度に加えて圧縮ヤング係数を算出した。また、JIS A 1103に従って2000kN耐圧試験機を用いて割裂引張試験を行い、引張強度を算出した。3等分点荷重曲げ試験はJCI-S-003-2007に準拠し、曲げスパンを300mmとして、試験体の純曲げ区間には引張側と圧縮側の双方に、1/500mm以上の精度を有するパイ型変位計ゲージを設置して荷重を行った。

2.4.4 自己修復試験

まずは材齢28日まで水中養生を行い、28日時点で試験体に初期ひび割れを導入して、その後は養生水槽で水中浸漬を行った。試験体を1週間ごとに取り出し、ダブルチャンバー方式のトレント法による表面透気試験⁹⁾を行い、透気係数を測定した。また、マイクロスコープによりひび割れ観察を行い、ひび割れ幅の測定を行った。透気係数とひび割れ閉塞率の経時変化により、ひび割れの自己修復効果を評価した。初期ひび割れの導入方法は、大坂ら¹⁰⁾の実験手法を参考に、試験体を上下反転させる3等分点曲げ試験とし、試験体の軸方向と垂直な方向に均等なひび割れを導入した。ただし、脆性的な破壊挙動につながる過大なひび割れとならないよう、1回目の荷重時には最大荷重の80%まで荷重が低下した時点で荷重を停止して除荷し、その後に反転して同等の変形量となるまで荷重を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ試験

図-1にスランプ・空気量と繊維混入率の関係を示す。図-1により、空気量については、Fsの混入率を増加するほど空気量が増大する傾向が確認された。これは、比表面積の大

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度 3.16 g/cm ³ 、比表面積 3230 cm ² /g
細骨材	S	S1：福島県産陸砂、 表乾密度 2.61 g/cm ³ 、実積率 64.2% S2：福島県産砕砂、 表乾密度 2.65 g/cm ³ 、実積率 65.1%
粗骨材	G	福島県産砕石、 表乾密度 2.69 g/cm ³ 、実積率 61.0%
減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物、 密度 1.05 g/cm ³

表-2 PP短繊維物性

繊維名称	略号	密度 (g/cm ³)	アスペクト比	繊維度 (dtex)	長さ (mm)	換算直径 (μm)	比表面積 (cm ² /g)
細径 PP短繊維	Fs	0.91	445	1.3	6	13.5	9180
太径 PP短繊維	F _L		53	1000	20	374	124

表-3 調合表

凡例名	単位使用量(kg/m ³)				W/C (wt.%)	s/a (vol.%)	繊維(vol.%)	
	W	C	S	G			Fs	F _L
S100-L0	275	688	540	659	40	45	1.00	—
S75-L25							0.75	0.25
S50-L50							0.50	0.50
S25-L75							0.25	0.75
S0-L100							—	1.00
NF							—	—

表-4 試験体概要

試験方法	試験体寸法	備考	
フレッシュ試験	—	—	
乾燥収縮試験	^w 100 mm× ^H 100 mm× ^L 400 mm	試験体3本を1セットとする	
強度試験	圧縮		φ100 mm× ^H 100 mm
	割裂引張		
	曲げ		
自己修復試験	^w 100 mm× ^H 100 mm× ^L 400 mm	—	

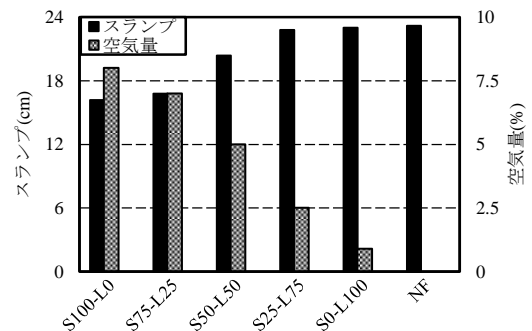


図-1 スランプ・空気量と繊維混入率の関係

きいFsの混入量が増加した場合、エントラップドエアが増加するためだと考えられる。また、スランプについて、繊維を混入しないNFと比較して、合計混入率を1.00 vol.%と固定した場合には、Fsの混入によりスランプが著しく低下する一方で、Fsの代わりにFLを多く混入することによってスランプ値が増大し、スランプの低下が抑制されることが確認された。

3.2 乾燥収縮試験

収縮ひずみおよび質量減少率の経時変化を図-2 および図-3に示す。図-2により、NFと比較して、繊維を混入した

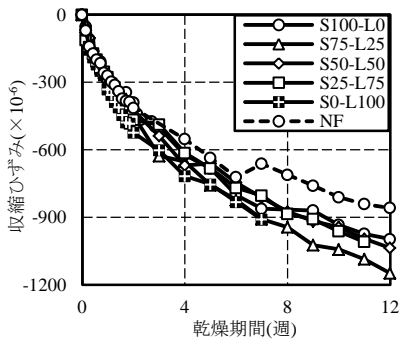


図-2 収縮ひずみの経時変化

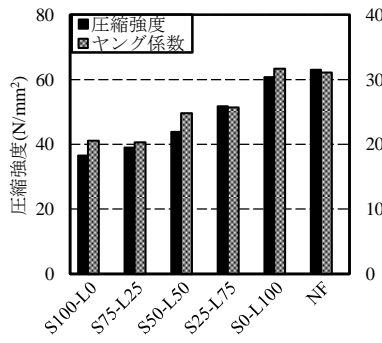


図-4 圧縮試験の結果

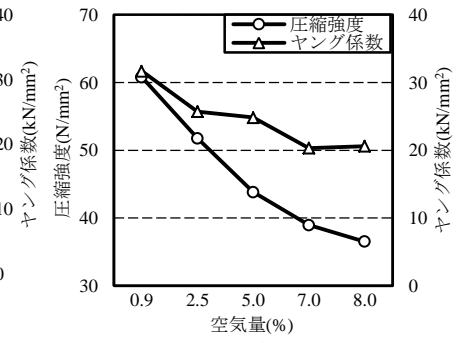


図-6 圧縮強度・ヤング係数と空気量の関係

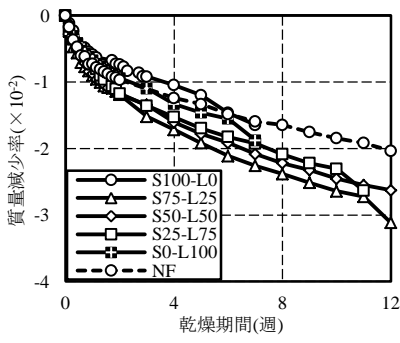


図-3 質量減少率の経時変化

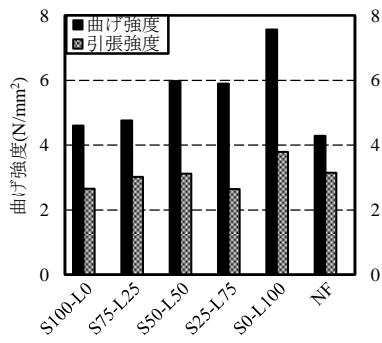


図-5 曲げ試験・割裂引張試験の結果

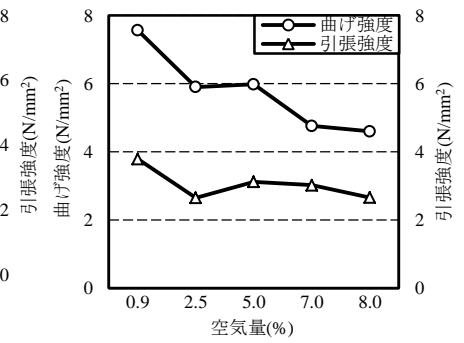


図-7 曲げ強度・引張強度と空気量の関係

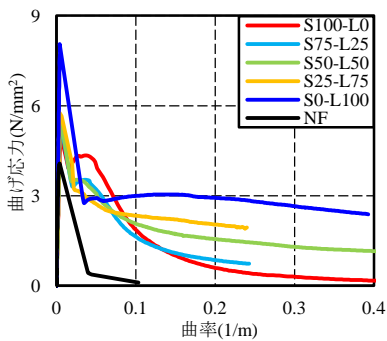


図-8 曲げ応力と曲率の関係

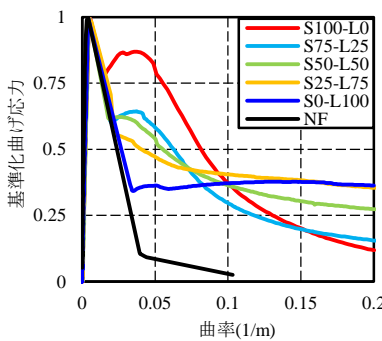


図-9 基準化曲げ応力と曲率の関係

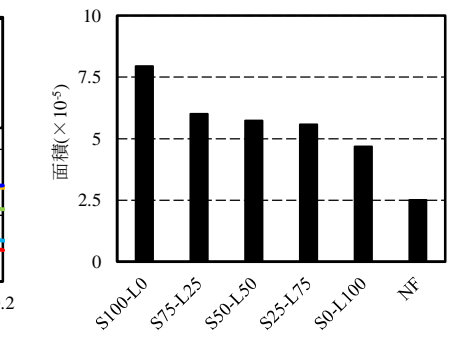


図-10 0.2 (1/m)までの曲線下面積

場合であっても収縮ひずみの経時変化には顕著な変化を確認できなかった。また、図-3に示すように、質量変化率についても繊維添加の有無による効果は顕著に見られなかった。

3.3 強度試験

図-4に圧縮試験の結果を、図-5に曲げ試験と割裂引張試験の結果を示す。図-4から、NFと比較して、繊維を混入するにしたがって圧縮強度とヤング係数は低下する傾向にある一方、繊維を合計1.00 vol.%混入した場合には、 F_L の混入率が大きくなるとともに、圧縮強度とヤング係数の双方が大きくなる傾向であることが確認された。図-5に示すように、繊維を混入することによって曲げ強度が向上することが確認され、引張強度については明らかな影響が認められなかった。また、図-6、7には図-4、5に示した各機械的性質を空気量との関係で整理した結果を示す。図に示されるように、各機械的性質は空気量と負の関係であることが確認された。これは、 F_S の混入率の増加に伴ってエントラップドエアが増大しているためと考えられる。消泡剤や細径繊維の投入のタイミング等を工夫して、細径繊維の多混入調合においても、機械的性質が向上する余地があると推察される。

図-8に、3等分点曲げ試験時の曲げ応力と曲率の関係を

示す。図に示されるように、すべての調合ではたわみ硬化は生じなかったものの、NFと比較して、繊維の混入によって曲げ靱性の改善が見られた。また、靱性を比較するために、最大曲げ応力で基準化した曲げ応力と曲率の関係を図-9に示す。ここには、靱性評価指標として、グラフの曲線下の面積を曲率0.2 (1/m)まで算出して図-10に示す。図に示されるように、NFと比較して、繊維の混入によって靱性の顕著な改善が見られた。特に、 F_S と F_L の比率に着目すると、 F_S の混入率を増大するとともに面積が大きくなる傾向であった。このことにより、曲げ強度を基準化して考えた場合、 F_L に比べて、 F_S は靱性の改善に対してより効果的だと考えられる。

3.4 自己修復試験

初期ひび割れ導入時の曲げ応力と曲率の関係を図-11に示す。図に示されるように、S0-L100およびS25-L75では、最大曲げ応力後には大きな応力低下が生じてしまい、目標とした最大応力の80%での制御が困難であった。図-12にマイクロスコブで撮影したひび割れの画像を、図-13にひび割れの閉塞率の経時変化を示す。ひび割れの閉塞率は、ひび割れ導入直後(0週)のひび割れ幅を基準として算出した。図-12に示すように、 F_S の混入率が比較的高いS100-L0と

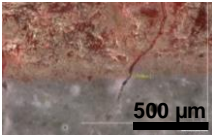
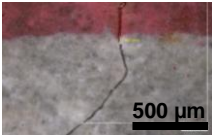
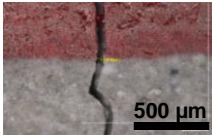
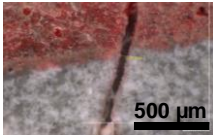
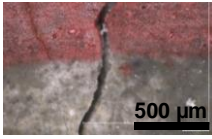
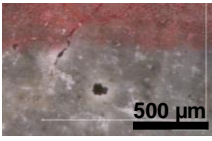
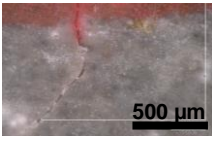
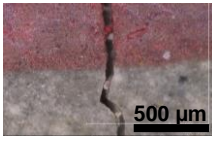
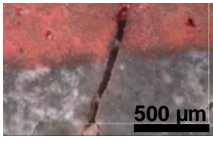
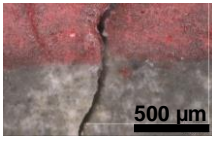
凡例名	S100-L0	S75-L25	S50-L50	S25-L75	S0-L100
水中浸漬 0週					
ひび割れ幅	25.00 μm	14.77 μm	60.60 μm	57.56 μm	74.92 μm
水中浸漬 8週					
ひび割れ幅	7.68 μm	3.26 μm	44.52 μm	44.36 μm	57.55 μm (4週)

図-12 ひび割れの画像およびひび割れ幅の平均値

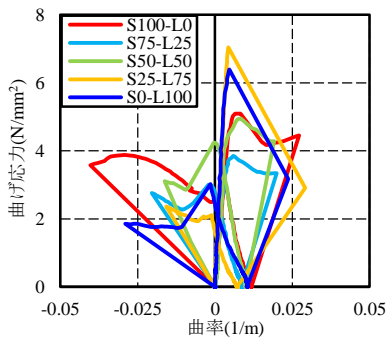


図-11 ひび割れ導入時の曲げ応力と曲率の関係

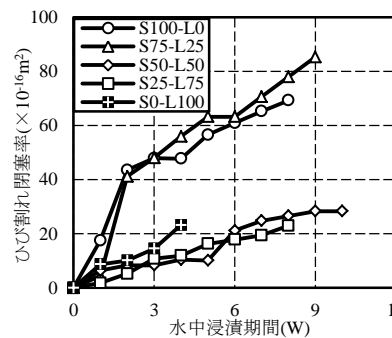


図-13 ひび割れの閉塞率の経時変化

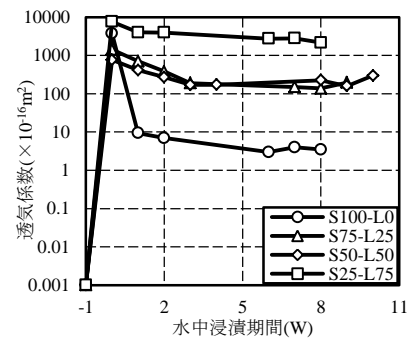


図-14 透気係数の経時変化

S75-L25 については、初期ひび割れ幅がその他の調合より小さい。また、S100-L0 と S75-L25 は、水中浸漬 8 週時点でひび割れの明らかな閉塞が確認できる一方で、その他の調合については、図-13 に示すように計測ひび割れ幅の減少が見られるものの、明らかな閉塞が確認できない。即ち、いずれもひび割れの自己修復が進行しつつあり、 F_s を多く混入した S100-L0 と S75-L25 は比較的高いひび割れ閉塞率が確認された。これは、 F_s によってひび割れ自己修復の促進効果が付与されたものと思われる。

また、図-14 に透気係数の経時変化を示す。その中で、水中浸漬-1 週および 0 週はひび割れ導入直前および直後の状態を意味する。透気係数が低いほど FRC 表面がひび割れ導入直前の状態に近く、気密性が高いことを意味するため、図-14 に示したとおり、水中浸漬とともに透気係数が減少して、ひび割れが徐々に閉塞されたことにより、気密性が回復することを確認した。また、 F_s と F_L の比率に着目すると、 F_s の混入率が高いほど透気係数の減少が早く、回復がより効率的である傾向が見られた。これは、 F_s のほうが、ひび割れ導入時にひび割れがより微細に分散された影響だと考えられる。

4. 結論

- 1) 細径 PP 短繊維は見かけの保水性を有するため、調合設計の際に単位水量を適切に増加する必要がある。
- 2) コンクリート中に細径 PP 短繊維を 1.0 vol.% 混入する場合、単位水量を増やすほか、練混ぜミキサ・材料の投入順序・W/C・s/aなどを工夫することにより、十分な流動性と締固めを両立できることが確認された。
- 3) PP 短繊維の使用は、乾燥収縮性状に対して明らかな効果が見られなかった。
- 4) PP 短繊維の混入により、圧縮強度が低下する一方、曲げ

強度が向上する傾向にある。また、細径 PP 短繊維混入率の増大に伴い、エントラップトエアに起因する空気量の増大により力学特性が低下する傾向にあると確認された。

- 5) 細径・太径 PP 短繊維を合計 1.0 vol.% 混入した場合、細径 PP 短繊維を多く混入することで初期ひび割れ発生後の急激な応力低下を抑制し、曲げ靱性が改善されることを確認した。
- 6) 細径 PP 短繊維により、ひび割れ幅の進展を抑えて自己修復を促進可能なことを確認した。

参考文献

- 1) 松尾庄二, 川又篤, 西脇敏一: 高靱性セメント複合材料の断面修復への適用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 307-312, 2005
- 2) 六郷恵哲: 高性能な繊維補強コンクリートの開発と将来展望, コンクリート工学特集/高機能・高性能化する繊維補強コンクリート/1. 総論, Vol. 50, No. 5, 2012.05
- 3) 国府田まりな, 三橋博三, 西脇智哉, 菊田貴恒: 合成繊維を用いた FRCC のひび割れ自己修復に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 667, pp. 1547-1552, 2011.09
- 4) 日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 2002
- 5) 平石剛紀, 坂田昇, 林大介, 山村正人: 剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 469-474, 2001
- 6) 細田暁, 高梨大介, 高木亮一, 我彦聡志: 少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 299-304, 2006
- 7) 西脇智哉, 岡屋洋志, 佐藤駿介: セメント硬化体のひび割れ自己治癒用繊維、その製造方法及びそれを含むセメント硬化体、並びにセメント硬化体のひび割れ補修方法, 2017-222555, 2017.12.21
- 8) Rossi, P.: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRCC) – an overview, Fiber-Reinforced Concrete (FRC) BEFIB'2000, RILEM, pp. 87-100, 2000
- 9) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 10) 大坂進太郎, 権代由範, 西脇智哉: 高強度高靱性セメント系複合材料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集, Vol. 39, No. 1, pp. 205-210, 2017