

論文 細径異形ポリプロピレン短繊維を使用した繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己治癒性能評価

武田 字浦*1・川崎 裕二郎*2・俊成 紘輝*2・山本 基由*3

要旨：本研究では、PP 短繊維混入率がセメントモルタルに導入したひび割れの自己治癒に及ぼす影響の考察を目的として実施した。その結果、ひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係から、PP 短繊維未混入の場合、ひび割れ幅が 0.4mm を超えるとひび割れが閉塞しにくい、すなわち自己治癒が期待できず、材齢が進行するに伴いその傾向は顕著であることが確認できた。また、材齢 7 日および 28 日供試体では、通水環境よりも静置環境の方の閉塞率が大きくなり、PP 短繊維を混入することでひび割れ閉塞率がほぼ 100% となった。一方、材齢 91 日供試体では、PP 短繊維混入により通水環境でのひび割れ閉塞率の方が静置環境よりも増加した。

キーワード：自己治癒、細径異形ポリプロピレン短繊維、ひび割れ閉塞率

1. はじめに

法面吹付モルタルは、施工対象を山の斜面などとするため、法面の傾斜、方角、風雨などの気候、吹付後の養生条件において、品質確保が困難となる条件がそろっている。優れた法面吹付モルタルの製造のために施工業者らが講じる対策の 1 つとして、補強繊維の使用が挙げられる。補強繊維は、モルタルのダレ防止、ひび割れ抑制、靱性向上などを主な目的として使用されている。中でも、ポリプロピレン短繊維（以降、PP 短繊維とする）は、汎用樹脂を使用しているため安価であり、密度が小さく、化学的に安定であるなどの特徴から、利用が増えている材料である。また、PP 短繊維による自己治癒性能が期待できるという研究もなされているが、1~2Vol.% という高い PP 短繊維混入率が想定されており^{2),3)}、実際の施工で使用するには費用面と施工性の面で実用性に欠ける。一方で、法面などの構造物に生じたひび割れが、PP 短繊維混入によって閉塞すれば、劣化因子の侵入を防ぐことが可能となり、構造物の長期耐久性向上へと繋がる有益な性質である。このため、混入率を 0.5% 以下と少量とした場合の自己治癒性能について、法面吹付モルタルで使用する状況を考慮しながら検証することとした。

ひび割れの自己治癒現象の要因には、a.未水和セメントの再水和、b.カルシウムイオンの炭酸化、c.セメントマトリクスの吸水・湿潤膨張、d.微粒子による閉塞などが挙げられる⁴⁾。短繊維を混入する場合、ひび割れ間を繊維が架橋することによるひび割れ効果が期待できる。同一混入率の場合には、繊維径が小さいほど繊維本数が増え、さらに分散する繊維間隔が小さくなることから、d.の影響が大きくなると考えられる。本研究で用いた PP 短繊維は、細径であり、かつ異形断面をもつため、一般的

な PP 短繊維に比べ比表面積が大きい。また、特殊表面処理を施しているため、セメント粒子を捕捉しやすいことから、d.に加え a.による自己治癒が発揮されることが期待できる。

本研究では、PP 短繊維混入率がセメントモルタルに導入したひび割れの自己治癒に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実施した。法面吹付モルタルの施工環境を想定して自己治癒環境条件を設定し、ひび割れの閉塞状況を観察した。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

本研究で用いた材料を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には海砂を使用した。PP 短繊維は、細径異形ポリプロピレン短繊維であり、写真-1 に示す断面を持つ繊維である。繊維の水分率は、乾燥質量に補正し用いた。

モルタルの配合を表-2 に示す。配合条件は、一般的に施工されている法面吹付モルタルの配合を基に、セメント:細骨材を 1:4、水セメント比を 50% とした。また、PP 短繊維混入率は、モルタル容積に対して、0, 0.2, 0.33% とした。

モルタルの練混ぜには、容量 20L のモルタル用ミキサを使用した。モルタルの練混ぜ手順は、次の通りとした。まず、セメント、細骨材、PP 短繊維を練鉢に入れ、60 秒間低速回転で空練りを行い、PP 短繊維を十分に分散させる。引き続き低速回転で 15 秒間かけて混合水(水、混和剤)を投入後、高速回転に切り替え、30 秒間練混ぜを行う。ミキサを 30 秒間停止し、その間にさじでかき落としを行った後、再度高速で 60 秒間練混ぜを行う。練混ぜ終了

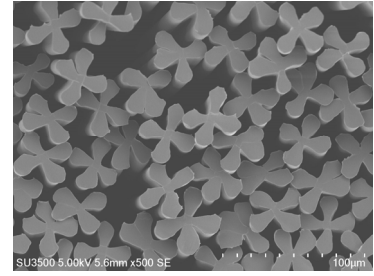
*1 明石工業高等専門学校 都市システム工学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 明石工業高等専門学校 都市システム工学科

*3 大和紡績株式会社 合繊事業本部 博士（工学）（正会員）

表－1 使用材料

材料（略号）	物性
セメント（C）	普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm ³
細骨材（S）	海砂、密度：2.56g/cm ³
短繊維（Fb）	細径異形ポリプロピレン短繊維，密度：0.91g/cm ³ 水分率：53.8%，繊度：5.4dtex（円換算直径：26μm）， 繊維長：15mm
混和剤（Ad）	AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体



写真－1 PP 短繊維の断面

表－2 モルタルの配合および供試体ひび割れ幅の平均値

配合名	W/C (%)	繊維混入率 (Vol.%)	C:S	単位量 (kg/m ³)				Ad (C×%)	ひび割れ幅 (mm)					
									材齢 7 日 供試体		材齢 28 日 供試体		材齢 91 日 供試体	
				W	C	S	Fb*		通水	静置	通水	静置	通水	静置
0%	50	0	1:4	210	420	1681	0	1	0.21	0.21	0.26	0.19	0.32	0.22
0.2%		0.2					1.82		0.13	0.17	0.43	0.28	0.38	0.45
0.33%		0.33					3.00		0.19	0.20	0.23	0.14	0.26	0.46

*乾燥繊維量を表記

後，練り鉢を機械から取り外し，さじで 10 回かき混ぜる。

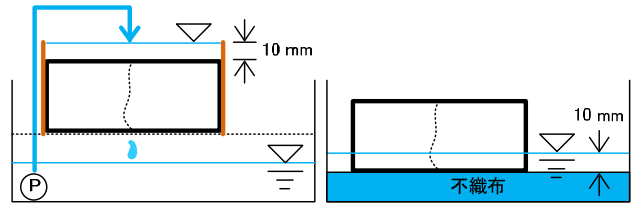
練上がったフレッシュモルタルは，φ100×200mm の円筒型枠に 2 層詰めで打込み，円柱モルタルを作製した。締固めにはテーブルバイブレーター用い，1 層目の打込み後 30 秒間の締固めを行った後，2 層目を打込み後さらに 90 秒間の振動締固めを行った。打込み面は，整形後ラップで覆い，所定材齢まで恒温恒湿室（温度 20±2℃，相対湿度 60±5%）で封緘養生を行った。

材齢 7，28，91 日に達した円柱モルタルから切出した φ100×40mm の円盤の側面にテープを巻き，万能試験機（容量 200kN）を用いて割裂引張試験の要領で載荷し，円盤中央部に直径方向にひび割れを導入した。ひび割れ導入後，側面のテープを巻き直し，上下面 3 か所ずつ，合計 6 か所のひび割れ幅をクラックスケールで測定し，その平均値を有効ひび割れ幅とした。各試験環境条件下で用いる 3 体の供試体の有効ひび割れ幅の平均値を表－2 に示す。

2.2 試験方法

(1) 自己治癒環境条件

自己治癒環境条件は，図－1 に示す 2 条件とした。1 つ目の条件は，供試体上面に 10mm 湛水した状態を保つことで常に一定流量の水を流し続ける環境条件（以降，通水環境とする）である（図－1(a)）。これは，実環境下における降雨などによる供試体上面（表面）から下面（内部）にかけての通水を模擬している。2 つ目の条件は，



(a) 通水環境

(b) 静置環境

図－1 自己治癒環境条件

不織布の上に置いた供試体下部を 10mm 浸水した状態で静置する環境条件（以降，静置環境とする）である（図－1(b)）。これは，実環境下における裏込め土など構造物裏面からの水分の供給を模擬している。各条件下での供試体数は，各配合 3 体ずつとした。また，室温 20±3℃ の環境下で試験を実施した。なお，供試体を水中に浸漬した浸漬環境よりも通水環境の方が，ひび割れの治癒効果が高いという研究報告⁹⁾があるため，本研究では浸漬環境は条件に加えないこととした。

(2) 漏水量試験

各供試体のひび割れからの漏水量（試験開始 0 日）を測定した後，それぞれの自己治癒環境条件下に供試体を設置し，各測定日（ t 日：1,2,5,6,7,12,15 日）に供試体を取り出しひび割れからの漏水量を測定した。ひび割れからの漏水量（ml/s）は，供試体上部に 10mm 湛水した状態で一定時間におけるひび割れからの漏水量を測定し算出した。初期の通水量の急激な低下には，ひび割れ間の

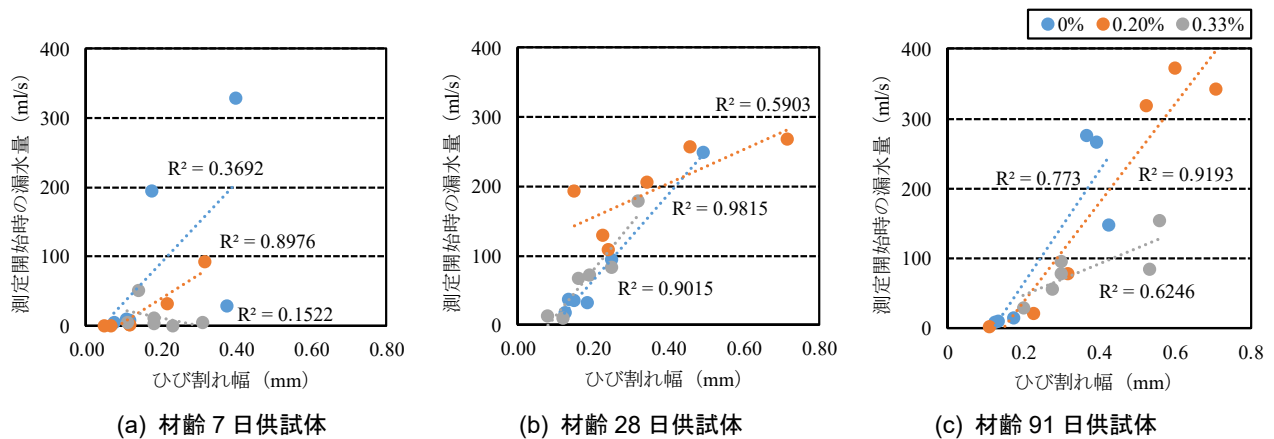


図-2 試験開始0日での漏水量とひび割れ幅の関係

気泡の影響が指摘されている⁴⁾。本試験条件では、気泡による見かけのひび割れ閉塞の影響を除去するために、測定毎に各試験環境条件下から供試体を取り出すとともに、ひび割れからの漏水が確認されなかった供試体は、1日気中で乾燥した後、再度漏水量を測定した。その結果、漏水が確認された供試体については各自自己治癒環境条件下に再度設置して観察を再開し、確認されなかったものは試験を終了し、再度乾燥後、表面観察を行った。

試験開始0日と各測定日における漏水量から、以下の式(1)よりひび割れ閉塞率 w_t (%) を算出した。

$$w_t = (q_i - q_t) / q_i \times 100 \quad (1)$$

ただし、 q_i : 試験開始0日における漏水量 (ml/s), q_t : 測定日 t 日における漏水量 (ml/s) とした。

(3) 表面観察

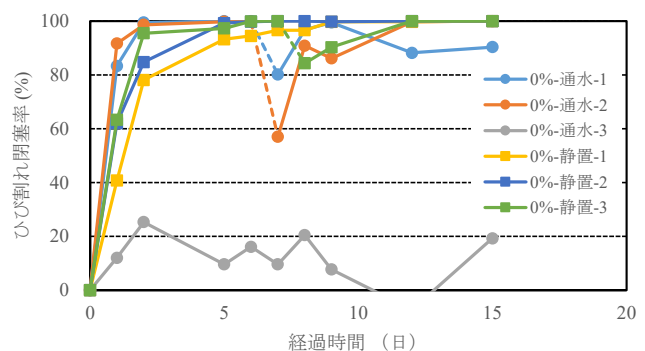
各供試体の試験開始時と終了後に、供試体表面の状況をマクロレンズによって接写撮影し、ひび割れの閉塞状況を観察した。

3. 結果および考察

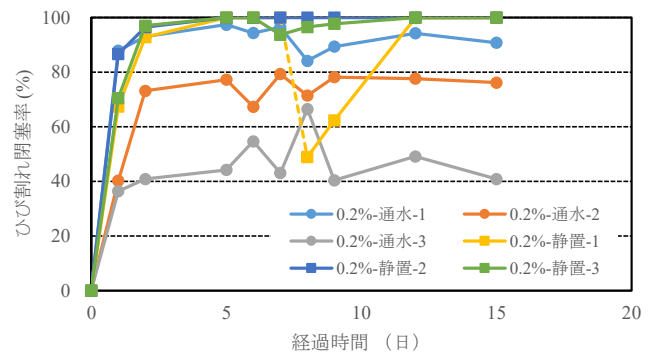
3.1 通水試験結果

(1) 測定開始時の漏水量とひび割れ幅の関係

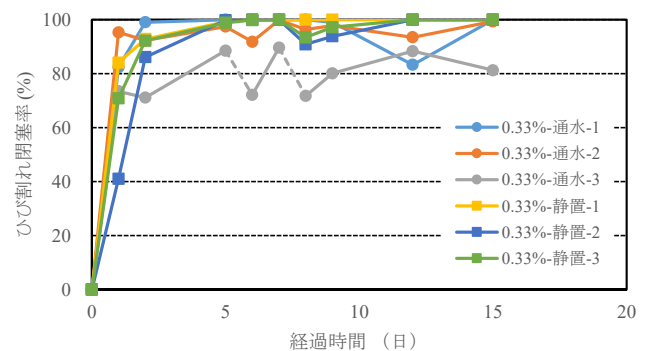
図-2 に試験開始0日での漏水量とひび割れ幅の関係 PP 短繊維混入率ごとに示す。材齢7日供試体(図-2(a))では、PP 短繊維混入率0%および0.2%ではひび割れ幅が大きくなるにつれ漏水量が増加したが、混入率0.33%ではひび割れ幅が大きくなっても漏水量が線形的に増加しなかったことから、ひび割れ間に架橋している PP 短繊維によって、漏水が防がれていると推察できる。PP 短繊維混入率0%の供試体では、ひび割れ幅0.4mmの2供試体を比較すると、漏水量が一方の1/10程度となった供試体も確認された。この2体の供試体の表面を観察すると、漏水量が多い供試体の方は、上面のひび割れ幅が下面と比較して大きかったことが影響していると考えられる。材齢28日供試体(図-2(b))でも、ひび割れ幅が大きく



(a) PP 短繊維混入率 0%



(b) PP 短繊維混入率 0.2%



(c) PP 短繊維混入率 0.33%

図-3 ひび割れ閉塞率の経時変化 (材齢28日供試体)

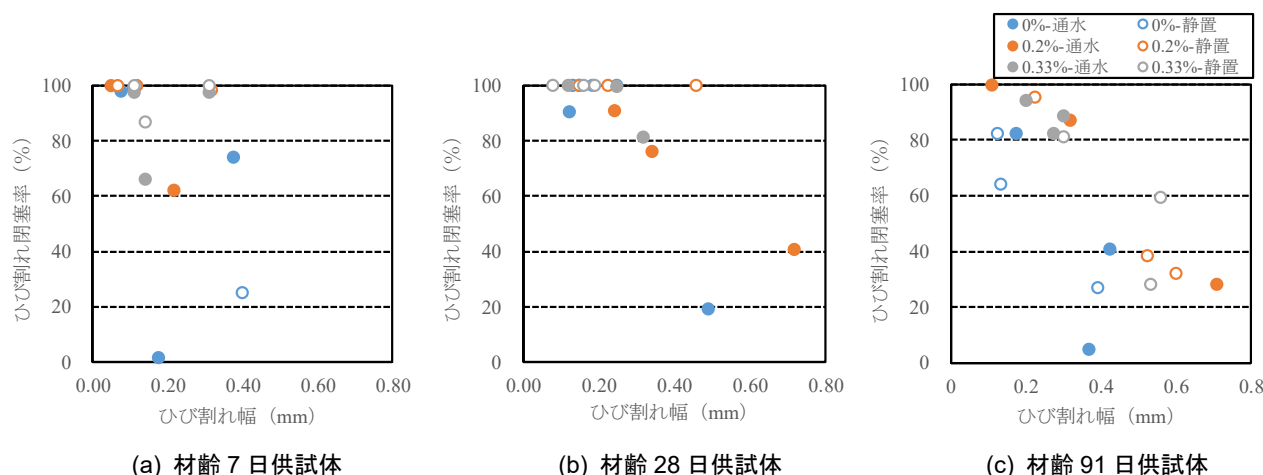


図-4 試験終了時のひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係

なるにつれて漏水量が増加した。PP 短繊維混入率 0.2% では、同程度のひび割れ幅で比較すると漏水量が大きい傾向を示した。供試体の表面を観察すると、材齢 7 日供試体と同様に、供試体上面のひび割れ幅と下面のひび割れ幅に差があることが確認できた。材齢 91 日供試体 (図-2(c)) においても、材齢 7 日および 28 日供試体の場合と同様、ひび割れ幅が大きくなるにつれて漏水量が増加した。

各試験材齢において、ひび割れ幅が大きくなると漏水量が増加する傾向が確認できた。一方で、同程度のひび割れ幅であれば、PP 短繊維混入率が大きくなると漏水量が低下する傾向も確認された。また、供試体上下面のひび割れ幅の差により漏水量が増加することも示唆された。この傾向により、ひび割れ間に架橋している PP 短繊維の量や方向によって、漏水量が変化する可能性が示唆された。ひび割れ間を架橋する短繊維の分散性は制御が難しいのが現状であるが、ひび割れ間の繊維の分布やひび割れ幅と繊維量の関係を検討することで、漏水量を低下できる余地があると推察できる。

(2) 漏水量の経時変化 (材齢 28 日供試体)

図-3 に材齢 28 日供試体のひび割れ閉塞率の経時変化を PP 短繊維混入率ごとに示す。図中の破線部は、2.2(3) で述べた乾燥後に通水試験を実施し、漏水が確認された場合の結果である。PP 短繊維混入率 0% の供試体 (図-3(a)) では、1 体の供試体を除き、いずれの配合、自己治癒環境条件においても、試験開始 15 日 (以降、試験終了時) にひび割れ閉塞率が 100% に近くなった。また、試験開始から 2 日にかけてひび割れ閉塞率が急速に増加している。ひび割れの閉塞は、通水環境下の方が静置環境下よりも速いことが見てとれることから、ひび割れ間の気泡による通水量への影響⁴⁾を除去しきれていない可能性も考えられる。ひび割れが閉塞しなかった供試体 (通水-3、図中の灰色の線) のひび割れ幅は 0.49mm であり、PP

短繊維を混入していない場合は、ひび割れ幅が 0.4mm を超えると自己治癒は期待できないと推察される。

PP 短繊維混入率 0.2% の供試体 (図-3(b)) においても、混入率 0% の時と同様、試験開始から 2 日にかけてひび割れ閉塞率が急速に増加し、その後、徐々に閉塞率が 100% に近づく傾向が確認された。試験終了時にひび割れ閉塞率が 80% を下回った供試体のうち、通水-2 供試体はひび割れ幅が 0.34mm、通水-3 供試体は 0.72mm であった。混入率 0.2% の場合、試験開始 5 日目でひび割れ幅 0.46mm の供試体 (静置-3、図中の緑色の線) のひび割れ閉塞率が 100% となった。

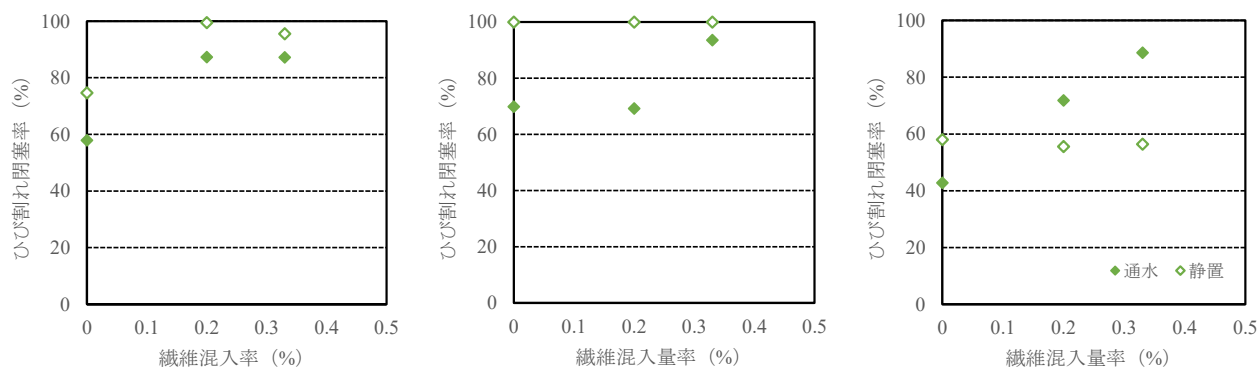
PP 短繊維混入率 0.33% の供試体 (図-3(c)) でも、ひび割れ閉塞率は、試験開始から 2 日にかけて急速に増加し、その後、徐々に閉塞率が 100% に近づいた。通水-3 供試体 (図中の灰色の線) のひび割れ幅は 0.32mm であったが、PP 短繊維混入率 0.2% の通水-2 供試体と比較すると、80% 程度のひび割れ閉塞率となった。

自己治癒は、材齢初期の段階が最も進みやすいという報告⁹⁾があり、本研究での結果も同様の傾向を示した。

3.2 ひび割れ閉塞率

(1) ひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係

図-4 に試験終了時におけるひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係を供試体材齢ごとに示す。材齢 7 日供試体 (図-4(a)) では、PP 短繊維を混入することで 60% 以上のひび割れ閉塞率となった。混入率 0% の供試体では、ひび割れの閉塞が全く観察されないものもあった。材齢 7 日供試体では、総じて、通水環境の方が静置環境よりもひび割れが閉塞しにくいという傾向が確認できた。材齢 28 日供試体 (図-4(b)) では、2 体を除きひび割れ閉塞率が約 80% 以上となった。ひび割れ閉塞率が 40% 以下となった 2 体の供試体は、いずれも通水環境下に設置していた供試体である。PP 短繊維混入率 0% の供試体では、0.4mm を超えるとひび割れの閉塞が期待できないと推察される。



(a) 材齢 7 日供試体

(b) 材齢 28 日供試体

(c) 材齢 91 日供試体

図-5 試験終了時のひび割れ閉塞率と PP 短繊維混入率の関係

材齢 91 日の供試体 (図-4(c)) では、全てのひび割れ幅 0.4mm を超える供試体において、PP 短繊維混入率および自己治癒環境条件にかかわらずひび割れ閉塞率が 60% 未満となった。

材齢 7 日および 28 日供試体では、ひび割れ幅 0.4mm を超える場合でも、静置環境下であればひび割れの閉塞が確認できたのに対し、材齢 91 日では、自己治癒環境条件に関わらずひび割れの閉塞が確認できなかったのは、未水とセメント量が関係していると考えられる。材齢 28 日までは未水とセメント粒子の水和反応により、静置環境においては炭酸カルシウムの生成と PP 短繊維への吸着により、ひび割れの閉塞が促進されていたと推察できる。一方で、材齢 91 日においては、材齢の進行に伴いセメントの水和反応が進行し、供試体内の未水とセメント量が減少したため、静置環境においてもひび割れの閉塞が確認できなかったと推察される。また、材齢 91 日では、導入したひび割れ幅が他の試験材齢と比較しても大きかったことも、条件を厳しくしたと考えられる。

ひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係から、ひび割れ幅が 0.4mm を超えるとひび割れが閉塞しにくい、すなわち自己治癒が期待できず、材齢が進行するに伴いその傾向は顕著であることが確認できた。この傾向は、自己治癒環境条件にかかわらず確認された。

(2) ひび割れ閉塞率と繊維混入率の関係

図-5 に試験終了時のひび割れ閉塞率と PP 短繊維混入率の関係を供試体材齢ごとに示す。ここでは、各試験条件 3 体の供試体のひび割れ閉塞率の平均値を示している。材齢 7 日供試体 (図-5(a)) では、PP 短繊維の混入によりひび割れ閉塞率は 80% 以上となった。また、通水環境よりも静置環境の方が閉塞率は大きくなり、PP 短繊維を混入することでほぼ 100% のひび割れ閉塞率となった。材齢 28 日供試体 (図-5(b)) では、PP 短繊維混入率にかかわらず、静置環境でのひび割れ閉塞率は 100% となった。PP 短繊維混入率 0.2% ではひび割れ幅が大きい

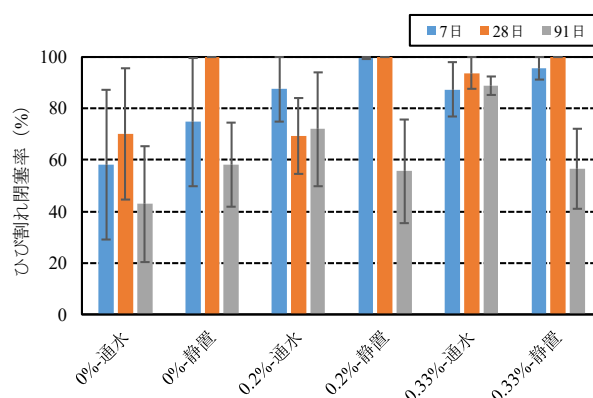


図-6 試験終了時のひび割れ閉塞率と自己治癒環境条件の関係

供試体のひび割れ閉塞率が小さかった影響で、混入率 0% と同程度と数値が低く出ているが、混入率 0.33% では、90% を超えるひび割れ閉塞率となった。

材齢 91 日供試体 (図-5(c)) では、PP 短繊維混入率にかかわらず、静置環境のひび割れ閉塞率は約 60% となり、混入率 0% の通水環境ではさらに低く 40% 程度のひび割れ閉塞率となった。一方で、PP 短繊維を混入した場合には、混入率の増加にともないひび割れ閉塞率は増加し、材齢 7 日および 28 日供試体とは異なり、通水環境でのひび割れ閉塞率の方が静置環境よりも増加した。3.2(1)でも述べた通り、この結果には未水とセメント量が影響していると考えられ、さらに通水環境下においては、混入した PP 短繊維がひび割れに架橋し、ひび割れ間を通過する微粒子などを捕捉することでひび割れが閉塞したと推察できる。

(3) ひび割れ閉塞率と自己治癒環境条件の関係

図-6 にひび割れ閉塞率と自己治癒環境条件の関係を示す。材齢 91 日供試体を除き、通水環境より静置環境でのひび割れ閉塞率が大きくなる傾向にあった。また、繊維混入率が増加するに伴い、試験結果のばらつきが小さくなったことから、PP 短繊維を混入することで、ひび割

れの自己治癒が促進されることが期待できる。

3.3 ひび割れ閉塞状況

表-3にPP短繊維混入率0.33%供試体のうち試験終了時にひび割れ閉塞率が100%となった供試体の、試験前後の表面状況の一部を示す。いずれの供試体表面も、上面か下面、もしくはその両方でひび割れの閉塞が確認できた。ひび割れ間に炭酸カルシウムの結晶が析出される場合と、微粒子などが捕捉される場合とでは、自己治癒のメカニズムが異なるだけでなく、強度回復や耐久性に及ぼす影響も異なる。このため、今後、ひび割れ間の析出物や繊維への吸着物の分析が必要となる。

4. 結論

本研究は、PP短繊維混入率がセメントモルタルに導入したひび割れの自己治癒に及ぼす影響を明らかにするため、通水環境および静置環境に設置した供試体の漏水量を測定しひび割れ閉塞率を比較・評価した。本実験の範囲から得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ幅が大きくなると漏水量が増加したが、同程度のひび割れ幅であれば、PP短繊維混入率が増加すると漏水量が低下する傾向が確認された。
- (2) PP短繊維混入率の増加に伴い、低混入率の際には閉塞しなかったひび割れ幅であっても、混入率が増加することで自己治癒をする傾向が確認できた。
- (3) 材齢7日および28日供試体では、静置環境の方が通水環境よりもひび割れが閉塞しやすいという傾向が確認できた。一方、材齢91日では、通水環境の方がひび割れの閉塞傾向が確認できた。
- (4) PP短繊維未混入の場合、ひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係から、ひび割れ幅が0.4mmを超えるとひび割れが閉塞しにくい、すなわち自己治癒が期待できず、材齢が進行するに伴いその傾向は顕著であることが確認できた。
- (5) 材齢7日および28日供試体では、PP短繊維の混入によりひび割れ閉塞率は80%以上となった。また、通水環境よりも静置環境の方の閉塞率が大きくなり、PP短繊維を混入することでほぼ100%のひび割れ閉塞率となった。一方、材齢91日供試体では、PP短繊維混入により通水環境でのひび割れ閉塞率の方が静置環境よりも増加した。

以上より、PP短繊維を用いることでひび割れの閉塞、すなわち自己治癒が期待できることが明らかとなった。引続き、ひび割れを閉塞させている物質およびPP短繊維への吸着物の分析、ならびにひび割れ間に分布している繊維量の確認を行い、より確実な自己治癒環境条件の解明が必要である。

表-3 PP短繊維混入率0.33%供試体の
ひび割れ閉塞状況

供試体	通水環境		静置環境	
材齢7日				
材齢28日				
材齢91日				

* 左：試験開始前、右：試験終了後

謝辞

本研究は、大和紡績株式会社 播磨研究所元研究員 佐藤駿介氏、山下憲司氏の協力を得て実施した。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 細田暁，高梨大介，高木亮一，我彦総志：少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構，コンクリート工学会年次論文集，Vol.28，No.1，pp.299-304，2006
- 2) 山田洵，西脇智哉，三橋博三，川上滋貴：乾湿繰り返し環境下におけるFRCCのひび割れ自己治癒に関する研究，日本建築学会東北支部研究報告集，Vol.77，pp.161-164，2014
- 3) 李豪傑，西脇智哉，佐藤駿介，五十嵐豪：異なる径のPP短繊維を多添加した繊維補強コンクリートの材料特性及びひび割れに対する自己修復機能に関する研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.41，No.1，pp.305-310，2019
- 4) 生駒勇人，岸利治：自己治癒減少に関わるコンクリートのひび割れ初期通水量の急速抑制メカニズムの解明，コンクリート工学会年次論文集，Vol. 36，No.1，pp.1648-1653，2014
- 5) 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
- 6) 小松怜史，細田暁，安台浩，池野誠司：ひび割れ間で通水する自己治癒コンクリートの治癒性状，コンクリート工学会年次論文集，Vol. 30，No.1，pp.117-122，2008