

# 論文 ポリプロピレン短繊維を部材表層のみに混入させた繊維補強コンクリートの基礎物性およびひび割れ抑制効果に関する研究

古川 雄太\*1・大岡 督尚\*2

**要旨:** 本報は、コンクリートの打込み後、コンクリート表面にポリプロピレン短繊維をばら撒き、コンクリートの打込み表層のみを繊維補強コンクリートとする新規な工法について、基礎物性、施工性およびひび割れ抑制について検討を行った。その結果、本工法を用いたコンクリートは、基礎物性に大きな影響を与えず、十分な耐久性を有することを確認した。また、容易に施工できるばら撒き量は 100g/m<sup>2</sup> 程度であることを明らかにした。そして、本工法を用いたコンクリートは、ポリプロピレン短繊維を混入していないコンクリートで発生するひび割れを 98.9~100%抑制することを確認した。

**キーワード:** ポリプロピレン短繊維, 繊維補強コンクリート, ひび割れ抑制

## 1. はじめに

以前より、コンクリートのプラスチック収縮ひび割れなどの抑制対策として、有機繊維をコンクリートに混入させる技術が用いられている。近年では、ポリプロピレン短繊維補強コンクリート設計施工指針(案)<sup>1)</sup>が発刊されるなど、技術基準が整備されつつある。有機繊維を用いたひび割れ抑制のメカニズムは、浜田らの研究<sup>2)</sup>では、有機繊維がひび割れに対して架橋する場合に、繊維の付着によってひび割れが生じることを抑制したり、ひび割れ幅が開くことを抑制したりする架橋効果が示されている。また、細田らの研究<sup>3)</sup>によれば、有機繊維の水分捕捉効果によって、ごく若材齢における体積変化が抑制されることで、ひび割れ抵抗性が向上する可能性が示されている。このため、有機繊維によるひび割れ抑制効果は、繊維長や表面処理により傾向は異なるが、架橋効果と水分捕捉効果の複合によるものと考えられ、ひび割れ抑制技術として普及しつつある。しかしながら、有機繊維をコンクリートに混入するには、レディーミクストコンクリート工場のミキサやアジテータ車のドラム内に添加する方法(以下、従来工法と略記)が一般的であり、どちらもコンクリートの練り混ぜ終了後または荷下ろし終了後に、繊維を除去するための洗浄作業が必要であり、この作業負担が普及の妨げとなっている。

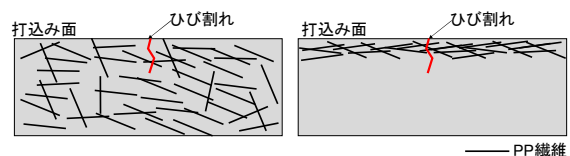
そこで筆者らは、スラブ状部材を対象に、打込んだコンクリートの均し作業前にポリプロピレン短繊維(以下、PP 繊維と略記)をばら撒き、罨などを使用した押さえ作業で PP 繊維をコンクリート内に混入させる工法(以下、ばら撒き工法と略記)に着目し、普及を進めている。なお、ばら撒き工法は、ミキサやアジテータドラムの洗浄を不要とする利点を有している。

しかしながら、ばら撒き工法を使用したコンクリート部材の基礎物性や施工性、ひび割れ抑制効果など不明確

な点が多い。そこで、本報では従来工法ばら撒き工法を用いたコンクリートの基本物性、施工性およびひび割れ抑制効果について検討した結果を報告する。

## 2. 工法の概要

ばら撒き工法は、打ち込んだコンクリートを荒均しした後、コンクリート表面に PP 繊維を所定量ばら撒き、罨やタンパーなどを使用し、押さえ作業と同時に PP 繊維をコンクリート表層に混入させる工法である。なお、PP 繊維の散布(ばら撒き)は、事前に面積当たりの必要繊維量を計量し、作業員の手作業による散布や、散布機を用いて機械的に散布する方法があり、いずれも事前に作成した目標散布量の写真などと照らし合わせ散布を行うものである。工法の違いによる PP 繊維の配置の違いを図-1 に示す。従来工法は、コンクリート全体に均一に PP 繊維を分散させるところには優れるものの、コンクリート表面に生じるひび割れに対して、架橋するように配置される PP 繊維もあれば、ひび割れに対して並行するように配置され、ひび割れ抑制効果に寄与しない PP 繊維も多数存在することとなる。しかし、ばら撒き工法を用いることで、コンクリート表層に水平方向の PP 繊維を多数配置させることができ、従来工法よりもひび割れに対して、架橋する繊維量を効率よく配置させることが可能となる特徴を有している。特に、本工法は、ひび割れの方向性が無い亀甲状に生じるプラスチック収縮ひび割れに対して、高いひび割れ抑制効果が期待されている。



【従来工法】 【ばら撒き工法】  
 図-1 従来工法とばら撒き方法の比較(部材断面)

\*1 東急建設株式会社 技術研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 東急建設株式会社 技術研究所 博士(工学) (正会員)

表-1 要因と水準

フェーズ		要因	水準
1	基礎物性実験	PP 繊維量	0, 0.4vol%, 175g/m <sup>2</sup> , 350g/m <sup>2</sup> , 525g/m <sup>2</sup>
2	施工性実験		0, 0.4vol%, 50g/m <sup>2</sup> , 100g/m <sup>2</sup> , 100g/m <sup>2</sup> (50+50 g/m <sup>2</sup> ), 150g/m <sup>2</sup> , 150g/m <sup>2</sup> (50+50+50 g/m <sup>2</sup> )
3	ひび割れ抑制実験		0, 0.4vol%, 50g/m <sup>2</sup> , 100g/m <sup>2</sup> , 150g/m <sup>2</sup>

### 3. 実験の要因と水準

本実験は、3つのフェーズに分けて実施した。フェーズ1（基礎物性実験）は、PP繊維を混入したコンクリートの基礎物性の把握について検討した。フェーズ2（施工性実験）では、ばら撒き工法の施工性やPP繊維の混入深さ、付着強度について検討した。フェーズ3（ひび割れ抑制実験）では、PP繊維無混入のコンクリートに対してのひび割れ抑制効果について検討した。実験の要因と水準を表-1に示す。フェーズIでは、PP繊維量を5水準、フェーズIIでは7水準、フェーズIIIでは5水準で検討した。なお、表-1内の50+50g/m<sup>2</sup>などの表記は50g/m<sup>2</sup>をコンクリート表面内に混入させた後、さらに50g/m<sup>2</sup>をコンクリート表層内に混入させ、累計で100g/m<sup>2</sup>のPP繊維量をコンクリート表層内に混入させたことを示す。また、PP繊維量0のものは、PP繊維を添加していないコンクリート（以下、ベースコンクリートまたはベースと称す）を示している。なお、0.4vol%繊維量は、従来工法を示している。

実験に使用したPP繊維の概要を表-2に示す。使用したPP繊維は、公称繊維径0.7mm、繊維長30mmのものであり、JISA 6208に適合する合成短繊維である。なお、使用したPP繊維は、事前検討により、施工が容易な長さ繊維径であることや、エンボス加工によりセメントペーストとの付着を高めているため、ひび割れ抑制に効果が高いと想定して選定した。

### 4. フェーズ1 基礎物性実験

#### 4.1 概要

表-3にコンクリートの調合を示す。水セメント比は65%、ベースコンクリートの目標スランプ18±2.5cm、目標空気量4.5±1.5%とした。PP繊維量0.4vol%のコンクリート（従来工法）は、ベースコンクリートと同一の調合に対しPP繊維を添加し、フレッシュ性状の変化を確認した。

試験項目を表-4に示す。フレッシュ性状（スランプ、空気量、ブリーディング量）、圧縮強度および静弾性係数は、ベースコンクリートおよび従来工法のみで実施した。また、促進中性化試験は、ばら撒き工法では打ち込み面のみにPP繊維を添加するため、中性化深さの評価面（開放面）は打ち込み面とし、その他の面はエポキシ樹脂によりシールを行った。

表-2 PP繊維の概要

項目	物性等
素材	ポリプロピレン
密度	0.91g/cm <sup>3</sup>
公称繊維径	0.7mm
繊維長	30mm
表面加工	エンボス加工
引張強度	500N/mm <sup>2</sup>
引張弾性率	10000N/mm <sup>2</sup>
融点	160~165℃

表-3 コンクリートの調合

W/C	s/a	Gかさ 容積(L/m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S1	S2	G	Ad
65	49.8	560	185	285	714	178	923	0.71

W：上水道水

C：普通ポルトランドセメント【密度3.16g/cm<sup>3</sup>】

S1：山砂【表乾密度2.63g/cm<sup>3</sup>】

S2：石灰岩砕砂【表乾密度2.66g/cm<sup>3</sup>】

G：青梅産硬質砂岩砕石2005【表乾密度2.70g/cm<sup>3</sup>】

Ad：AE減水剤【リグニンスルホン酸系】

表-4 試験項目および方法

試験項目	方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ブリーディング	JIS A 1123
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
長さ変化	JIS A 1129-2
凍結融解	JIS A 1148(A 法)
促進中性化	JIS A 1152, JIS A 1153

表-5 フレッシュ試験結果および力学性状

種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
ベース	19.0	5.0	0.32	28.3	28.1
従来工法	17.0	5.4	0.28	26.2	27.1

#### 4.2 試験結果および考察

表-5にベースコンクリートおよび従来工法のフレッシュ試験結果および力学性状（材齢28日標準養生）を示す。スランプは、ベースコンクリートが19.0cmに対し、従来工法では17.0cmとなり、2.0cmのスランプの低下が

認められた。また、空気量はベースコンクリートが 5.0% に対し、従来工法で 5.4%と 0.4%の増加が認められた。このように、従来工法は打込む前のコンクリートに PP 繊維を混入するため、スランブの低下や空気量の増加が生じることから、打込むコンクリートが所要の品質を有するようにベースコンクリートの調合修正や PP 繊維添加時に化学混和剤の添加など対策が必要な場合がある。ブリーディング量は、ベースコンクリートに対し従来工法を用いることで低減することが認められ、既往の研究<sup>3)</sup>と同様な傾向を示した。なお、圧縮強度および静弾性係数に大きな差はないものの、従来工法では空気量の増大に伴いやや低下する傾向が確認された。

図-2 に長さ変化試験結果を示す。ベースコンクリートと従来工法を比較すると、僅かに従来工法の長さ変化が大きいものの、乾燥期間 182 日での差は  $15 \times 10^{-6}$  であり、同等の長さ変化とみなして差し支えない差であった。また、ばら撒き工法はいずれの添加量でもベースコンクリートと同等の長さ変化であることから、従来工法およびばら撒き工法の両工法とも、PP 繊維を混入しても拘束のない条件下での長さ変化は同等と考えられる。

図-3 に凍結融解試験結果を示す。全てのコンクリートで 300 サイクル終了時点の相対動弾性係数が 95%以上であり、良好な耐凍害性を有することを確認した。また、図-4 に示す質量減少率は、ばら撒き工法の 175g/m<sup>2</sup>の添加量のコンクリートが他のコンクリートに比べやや大きい値ではあるが、全体的にはベースコンクリートと比較しても大きな差がなく、同等の質量減少率（スケリング）であることを確認した。

図-5 に促進中性化試験結果を示す。ベースコンクリートと比較すると、従来工法およびばら撒き工法ともに中性化深さに大きな差が認められない傾向であった。ばら撒き工法は、打ち込み面に多数の PP 繊維が配置されることから、セメントペーストと PP 繊維の界面から炭酸ガスが侵入し、中性化深さの増大が懸念されたが、本検討結果ではその傾向は確認されなかった。この要因としては、本検討に使用した PP 繊維の表面はエンボス加工が施されているため、セメントペーストとの付着が十分であり、中性化深さに影響するような付着界面の空隙が生成されなかったと推測される。

## 5. フェーズ 2 施工性実験

### 5.1 概要

図-6 に施工性実験に使用した試験体概要を示す。試験体サイズは、2000×2000×300mm のスラブ形状とした。ばら撒き工法では、バイブレータを使用しながらコンクリートを打ち込み、荒均しした後、PP 繊維を所定量ばら撒き、タンパーでの押さえ作業を行い、PP 繊維をコンク

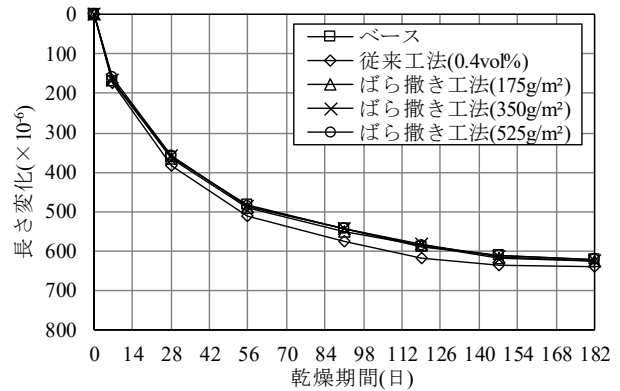


図-2 長さ変化試験結果

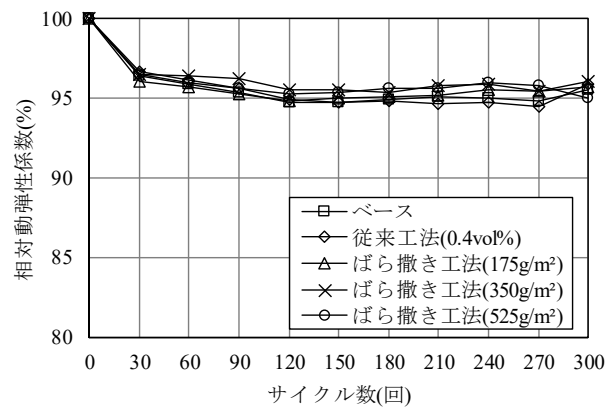


図-3 相対動弾性係数

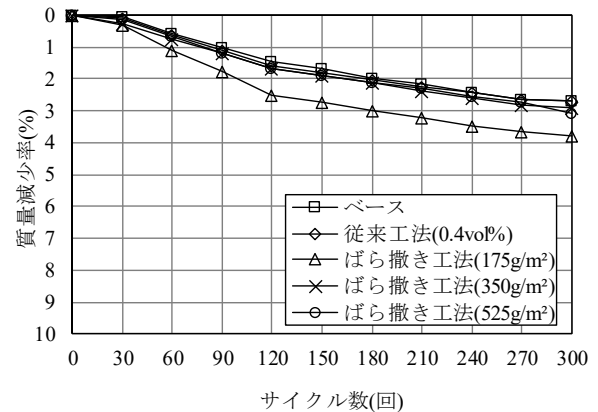


図-4 質量減少率

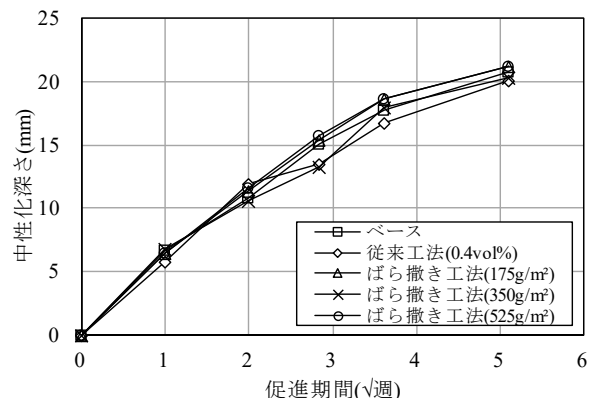


図-5 促進中性化試験結果

リート表層内へ配置させた。なお、ばら撒き工法で2回または3回に分けてPP繊維を添加したコンクリートは、タンパーで押さえた後、再度PP繊維をばら撒きタンパーで押さえる作業を繰り返した。その後は、通常のコンクリートと同様に、鏝による均し作業を行った。ただし、一部の水準でタンパーでの押さえ作業ではコンクリート内へ配置されなかったPP繊維があり、鏝による入念な押さえ作業によりコンクリート内へ配置させる必要がある個所も確認された。また、従来工法に関しては、アジテータ内のベースコンクリートにPP繊維を添加(0.4vol%)したコンクリートを用いて打ち込みを行った(パイブレータ使用)。なお、押さえ作業については、ばら撒き工法と同様な手順で行った。

表-6に試験項目を示す。施工性評価は、PP繊維のばら撒き作業性、押さえの作業性、全体の施工性についてそれぞれ主観的な評価も含むが、作業員の作業量の増減や作業性の聞き取り調査(作業員3名)から3段階で評価した。混入深さは、Φ100×300mmのコア供試体を3本用い、割裂した後、割裂面に露出するPP繊維量をカウントした。引張接着強度は、建研式引張試験機を用い、40×40mmのアタッチメントをコンクリート表面(打込み面)に取付け試験を実施した。なお、各試験体から6ヶ所で測定を行い、平均値を試験値とした。

実験に使用したコンクリートの呼び方は24-15-20Nの普通コンクリートであり、市中のレディーミクストコンクリート工場で製造したものを使用した。

## 5.2 試験結果および考察

表-7に作業性および施工性の評価結果を示す。また、写真-1にPP繊維のばら撒き状況およびタンパーによる押さえ作業の写真を示す。表-7より、従来工法では、押さえ作業は良好な作業性であるものの、PP繊維の投入・攪拌や洗浄作業が負担であり、全体の施工性は良好とは言い難い結果であった。

ばら撒き工法に関しては、50g/m<sup>2</sup>および100g/m<sup>2</sup>のばら撒き量では、ばら撒き・押さえの作業性は良好であり、全体の施工性としても良好であった。しかしながら、150g/m<sup>2</sup>のばら撒き量になると、前述したように、鏝による入念な押さえ作業によりPP繊維をコンクリート内に混入させる必要があり、やや押さえ作業に時間と労力を要する結果であった。また、1回あたりのばら撒き量を50g/m<sup>2</sup>とし、3回に分けて150g/m<sup>2</sup>(50+50+50g/m<sup>2</sup>)のPP繊維をばら撒いたものは、ばら撒き作業の回数が増えるものの、コンクリート内部に容易にPP繊維が混入されるため、1度で150g/m<sup>2</sup>のPP繊維を混入させるものに比べ、押さえ作業が容易になることを確認した。

以上より、従来工法に比べばら撒き工法は作業性が向

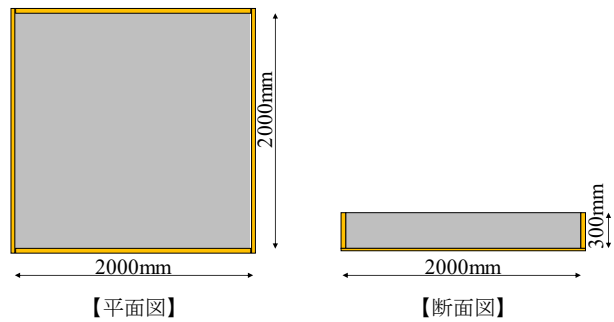


図-6 試験体概要

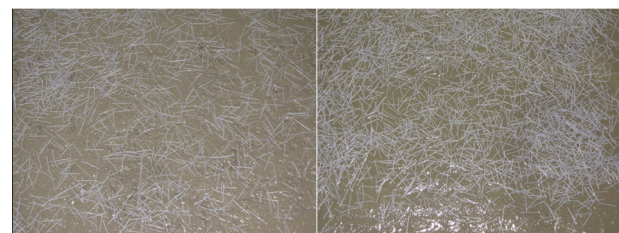
表-6 試験項目および方法

フェーズ	試験項目	方法
II	施工性評価	目視(3段階評価)
	混入深さ	Φ100mmのコア供試体割裂面のPP繊維の本数のカウント
	引張接着強度	建研式引張試験機 40×40mmのアタッチメント

表-7 施工性の評価結果

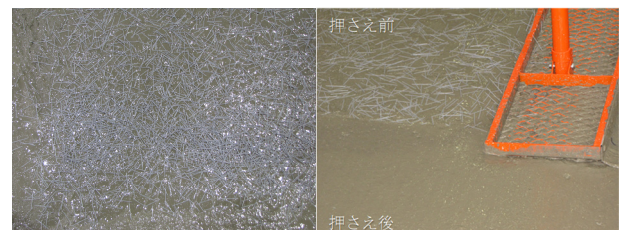
種類		評価結果		
		ばら撒き 作業性	押さえ 作業性	全体の 施工性
従来工法	0.4vol%	—	○	×
ばら撒き工法	50g/m <sup>2</sup>	○	○	○
	100g/m <sup>2</sup>	○	○	○
	50+50g/m <sup>2</sup>	△	○	○
	150g/m <sup>2</sup>	○	×	△
	50+50+50g/m <sup>2</sup>	×	○	△

—: 作業なし, ○: 良好, △: 中間, ×: 問題あり



【50g/m<sup>2</sup>】

【100g/m<sup>2</sup>】



【150g/m<sup>2</sup>】

【タンパー押さえ作業】

写真1 ばら撒き状況および押さえ作業

上するとともに、1回あたりのばら撒き量は100g/m<sup>2</sup>程度が良好であり、PP繊維の混入量を増やすには、複数回に分けて混入することが望ましいと考えられる。ただし、適切な1回あたりのばら撒き量は、使用するコンクリ

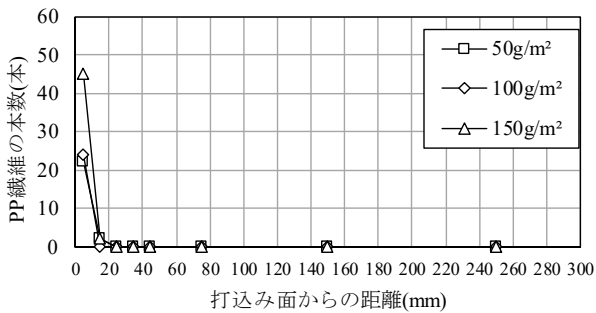


図-7 打込み面からの距離と PP 繊維の本数の関係

トの調査条件などによって変動すると考えられる。

図-7に各施工条件のPP繊維の混入深さを示す。いずれのばら撒き量であっても、打込み面から20mm以内にほぼ全量のPP繊維が配置されることが認められる。また、図-8には、所定のPP繊維量を複数に分けたものと一度でばら撒いたものの比較を示す。図-8からは、複数回に分けることで表層20mm以内のPP繊維量が増える傾向が確認できる。これは、ばら撒き工法が人為的にPP繊維をばら撒くため、作業上の斑が生じることで、PP繊維の所定量に対して、ある程度のばらつきを持っているため、本研究の3ヶ所の測定値では、1度にばら撒いたものでは繊維量が少ない部位を測定していた可能性がある。言い換えると、複数回に分けてばら撒くことで、作業上の斑が少なくなり、全体的に均一な繊維量を配置させることができる可能性が示唆された。なお、打込み面から20mm以内に全てのPP繊維が配置されると仮定すると、コンクリート表層20mmに対するPP繊維の添加量は50g/m<sup>2</sup>のばら撒き量で0.27vol%、100g/m<sup>2</sup>で0.54vol%、150g/m<sup>2</sup>で0.82vol%に相当し、前述の0.4vol%では圧縮強度や静弾性係数に著しい影響を及ぼさないことを考慮すると、100g/m<sup>2</sup>程度までは力学性状に大きな影響を及ぼさないことが想定される。しかしながら、スラブ状部材の場合、繊維が集約された部分が圧縮縁となり、繊維の集約が力学性状にどのような影響を及ぼすかは不明確であり、今後の研究課題である。

図-9に引張接着強度試験結果を示す。PP繊維無混入のもの比べると、ばら撒き工法および従来工法ともに明確に付着強度が低下するような傾向は認められず、同等の付着性能と考えて差し支えない結果であった。よって、ばら撒き工法を用いた部材であっても、塗床などの仕上げを行っても問題ないと考えられる。

## 6. フェーズ3 ひび割れ抑制性実験

### 6.1 概要

図-10にひび割れ抑制実験に使用した試験体の概要を示す。試験体は、914×914×6mmの鉄板上にφ5mmのワイヤメッシュを溶接したものを拘束体とし、周囲を端太角により覆い、高さ50mmのコンクリートを打込み、

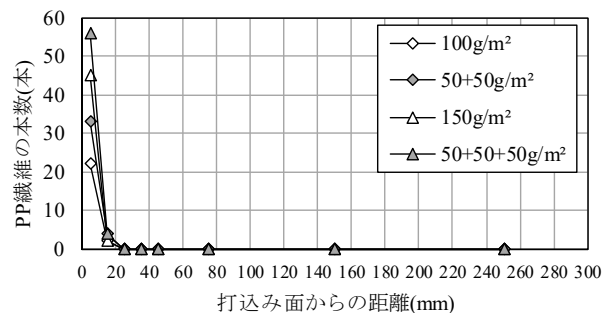


図-8 ばら撒き方法の違いによる比較

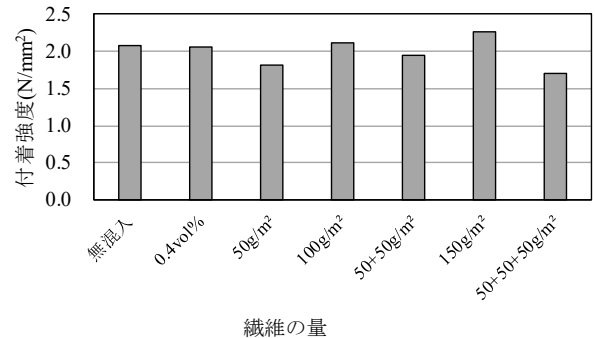


図-9 付着強度試験結果

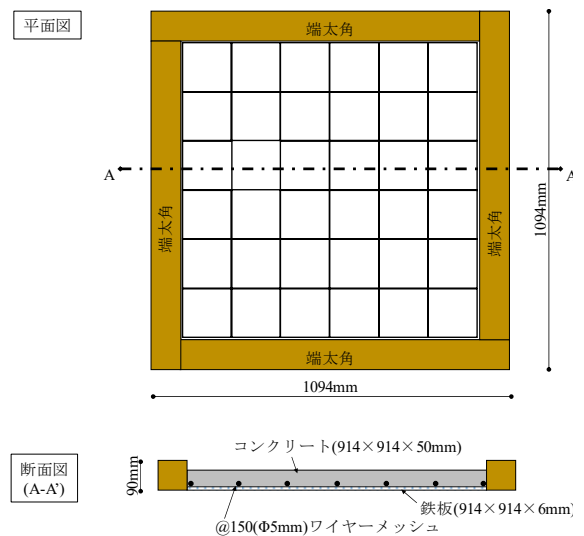


図-10 試験体概要

表-8 コンクリートの調査およびフレッシュ性状

W/C	s/a	Gかさ 容積 (L/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									フレッシュ性状		
			単位量						フレッシュ性状			フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SL	Air	CT	SL	Air	CT		
45	50.0	482	230	512	765	780	12.5	1.2	35	12.5	1.5	35		

W: 上水道水

C: 普通ポルトランドセメント【密度 3.16g/m<sup>3</sup>】

S: 山砂【表乾密度 2.63g/cm<sup>3</sup>】

G: 青梅産硬質砂岩砕石 2005【表乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>】

\* SL:スランプ, Air:空気量, CT:コンクリート温度

試験に供した。また、試験体はひび割れの発生を誘発するために、室温 37℃、湿度 20%RH、平均風速 0.86m/s (コ



ンクリート打込み面) の環境下でコンクリートの打込みを行い、同環境下で養生した。その後、24 時間後にコンクリート表面に発生している 0.1mm 以上のひび割れを対象に、幅と長さを測定し、それらを乗じることでひび割れ面積として評価した。

コンクリートの調合およびフレッシュ性状を表-8 に示す。本実験では、単位水量が大きく化学混和剤を使用しない調合条件としたことが影響し、PP 繊維を混入してもフレッシュ性状の変化が小さい傾向であった。

## 6.2 試験結果および考察

図-11 にひび割れ面積の測定結果を示す。PP 繊維無混入の試験体では 205.9mm<sup>2</sup> のひび割れ面積であったのに対し、従来工法で 15.8mm<sup>2</sup>、ばら撒き工法の繊維量 50g/m<sup>2</sup> で 2.2mm<sup>2</sup>、100g/m<sup>2</sup> および 150g/m<sup>2</sup> ではひび割れが発生しない結果であり、ひび割れの抑制効果が認められた。図-12 には、繊維無混入の試験体で発生したひび割れ面積に対して、各工法のひび割れ抑制率を示している。図-12 より、従来工法で 92.3% のひび割れ抑制率であり、ばら撒き工法では繊維量 50g/m<sup>2</sup> で 98.9%、100g/m<sup>2</sup> および 150g/m<sup>2</sup> では 100% のひび割れ抑制率であることが認められ、両工法とも高いひび割れ抑制効果があることが示された。

以上より、ひび割れが発生しやすい条件下での比較検討ではあるが、PP 繊維無混入の試験体に対し、従来工法で 92.3%、ばら撒き工法で 98.9~100% のひび割れ抑制効果が示され、ばら撒き工法がひび割れ抑制対策としての性能を有していることが確認された。

## 7. まとめ

打込む前のコンクリートに PP 繊維を混入し、PP 繊維が混入されたコンクリートを打込む従来工法と、打込んだコンクリート表面に PP 繊維をばら撒き、押さえ作業により PP 繊維をコンクリート内に混入させるばら撒き工法を用い、基礎物性、施工性およびひび割れ抑制について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 従来工法は、PP 繊維を混入することでスランプの低下と空気量の増加が認められた。
- (2) 従来工法を用いることで、ブリーディング量が小さくなることが認められた。
- (3) 従来工法およびばら撒き工法の長さ変化、凍結融解抵抗性および中性化深さは、繊維無混入コンクリートと同等と考えて差し支えない結果であった。
- (4) 1 度のばら撒き量は 100g/m<sup>2</sup> 以下が適切であり、混入量を増やすには複数回に分けてばら撒くことが望ましいことを確認した。
- (5) ばら撒き工法では、打込み面から 20mm 以内にほぼ

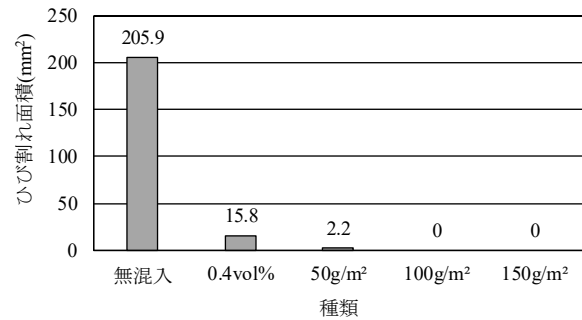


図-11 ひび割れ面積の測定結果

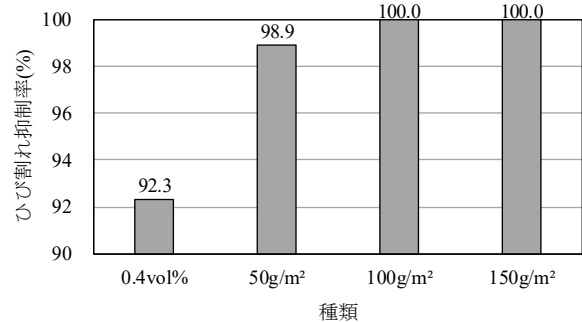


図-12 ひび割れ抑制率

全量の PP 繊維が配置される傾向が認められた。また、複数回に分けてばら撒くことで、作業上の斑が少なくなり、全体的に均一な繊維量を配置させることが可能であることが示唆された。

- (6) 従来工法およびばら撒き工法ともに、引張付着強度は繊維無混入のものと同様な結果であり、塗床などの仕上げを行っても問題ないと考えられる。
- (7) ひび割れ抑制については、繊維無混入で発生するひび割れに対し、従来工法で 98.9%、ばら撒き工法で 98.9~100% のひび割れ抑制効果が確認でき、ひび割れ抑制対策としての性能を有していることを確認した。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、萩原工業株式会社室賀陽一郎氏より材料の提供および実験遂行に関する助言をいただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) ポリプロピレン短繊維普及研究会：ポリプロピレン短繊維補強コンクリート設計施工指針(案)，2018
- 2) 浜田敏裕，末森寿志，斉藤忠，平居孝之：ビニロン短繊維によるコンクリートのプラスチック収縮ひび割れ抑制に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.319-324，2000
- 3) 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