

論文 少量の合成短繊維添加による打込み後の収縮抑制と凝結遅延

高木 亮一^{*1}・細田 暁^{*2}

要旨：少量の合成短繊維は、打込み直後のコンクリートに種々の影響を及ぼす。繊維の物性を種々変化させ、自己収縮試験および凝結試験を行った。その結果、少量の合成短繊維の添加によりペーストの打込み直後からの収縮が抑制されることや凝結が遅延することが明らかになった。繊維の持つ親水性により、自己乾燥に起因する収縮を抑制させることや凝結遅延が引き起こされたとの考察を示した。

キーワード：収縮抑制, 合成短繊維, 親水性処理, 自己乾燥, 凝結, プラスチック収縮

1. はじめに

少量の合成短繊維をコンクリートに添加することによる剥落対策が検討され、近年その使用が増加している¹⁾。そして、実構造物の剥落対策に使用されている各種の合成短繊維は、コンクリートのブリーディングを抑制すること、ペーストのプラスチック収縮ひび割れを抑制することを著者らは確認している²⁾。すでに剥落対策として使用されており、少量添加で施工性への影響が少ないため、合成短繊維はコンクリートの品質改善対策として汎用的に使用される可能性がある。

しかし、少量の合成短繊維によるこれらの改善効果は、その機構が十分には解明できていない。例えばひび割れ抑制のメカニズムを解明できれば、繊維の適切な使用や、最適な繊維の開発が可能になる。

少量の合成短繊維の効果の大半は打ち込み直後からプラスチックな状態までに発揮される可能性が高い。著者らは、合成短繊維が材齢初期のペーストの体積変化を抑制させ、プラスチック収縮ひび割れを抑制させると考察した²⁾。しかし、そのことを直接示す実験結果は得られていない。また、少量の合成短繊維添加により凝結時間に影響が表れることが既往の研究で報告されている³⁾。

そこで本研究では、材齢初期のペーストの自己収縮試験と凝結試験を行い、繊維の物性や素材の違いが及ぼす影響を明らかにする。さらに繊維がプラスチック収縮ひび割れを抑制するメカニズムについて考察を行う。

2. 実験概要

自己乾燥は打込み直後から起こり、水分の逸散が生じない条件下で水和反応に伴い練り混ぜ水の一部が消費され乾燥状態となることである。またプラスチック収縮の一部であると同時に、自己収縮の主駆動力として知られている現象である⁴⁾。

著者らは既報²⁾において、短繊維がコンクリート中の水分を捕捉する捕水効果を持つという考察を示している。この捕水効果によりペーストの収縮が抑制される可能性があると考えた。このため水分の逸散が生じない状態での収縮が計測可能な自己収縮試験を行った。打込み直後からの収縮の計測が可能な低弾性埋め込みひずみゲージを使用したことが特徴である。

凝結は、水和反応によって流動性を失い次第に硬くなる現象である。凝結が生じる時間は、繊維が大きな影響を与えると我々が考えている時間と一致するため、水セメント比や繊維の添加量などをパラメータに、凝結試験を行った。

*1 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 助教授 博(工) (正会員)

2.1 自己収縮試験

試験に使用した繊維の物性値を表-1に示す。繊維の形状はすべて棒状で、表面に物理的な突起などは有していない。配合条件は表-2に示すように、ペーストは普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 30%のものに高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を W×1% 添加したものである。セメントの密度は 3.16 g/cm^3 、比表面積は $3370 \text{ cm}^2/\text{g}$ である。

繊維はペーストに対する体積比で 0.3% 添加を基本とした。この添加量にした理由は、剥落対策¹⁾では繊維をコンクリートの体積比 0.1% 以下で使用しており、これをコンクリート中のペーストに対する体積比に換算すると約 0.3% 程度となるためである。実構造物で使用されている繊維長と対応させるため、繊維長はすべて 12mm とした。

供試体の種類を表-3に示す。繊維の物性として、材質、繊維径、親水性の有無（PP 繊維）、添加量を変化させた。供試体は各パラメータに対して 2 体である。

試験は自己収縮委員会報告集⁴⁾、既往の研究⁵⁾を参考に行った。練混ぜはホバート型ミキサーを使用し、セメントと水を投入し 60 秒、その後繊維を投入し 60 秒間（繊維無混入に関しても練混ぜ条件を同じにするため 60 秒間）を行った。

繊維を練混ぜ水を加える前に添加すると、ブリーディング抑制効果やプラスチック収縮ひび割れ抑制効果が減少することを確認している²⁾。このため、繊維はペーストを練り混ぜた後に添加した。

図-1 に示すように型枠（10×10×40cm）内の底面に摩擦を断つためのテフロンシート、両端面に端面との拘束を防ぐためのポリエチレンボード、および打設面を含めた全面に水分逸散を防ぐためのポリエステルフィルムを施し、ペーストを打ち込んで、温度 20℃、相対湿度 60% の恒温室に静置した。

測長は打込み直後から、市販されている低弾性埋め込みゲージ（弾性係数：1.5MPa、標点距

表-1 使用した繊維の物性値

繊維名称	原材料	直径 (μm)	ヤング係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	備考
PP-27	ポリプロピレン	27	4200	550	
PP-43		43	7500	500	
PP-65		65	5000	530	親水性処理なし
PP-NC					
NY-15	ニュークリート	15	4000	670	
NY-19		19			

表-2 基準ペーストの配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m^3)		
	水	セメント	混和剤
30	482	1622	4.87

表-3 自己収縮試験

	W/C (%)	繊維長 (mm)	添加量 (Vol%)	使用繊維
ベース	30	12	0	—
PP-27			0.3	PP-27
PP-43				PP-43
PP-65				PP-65
PP-NC				PP-NC
NY-15				NY-15
NY-19				NY-19
NY-19-0.6			0.6	
PP-65-0.6				

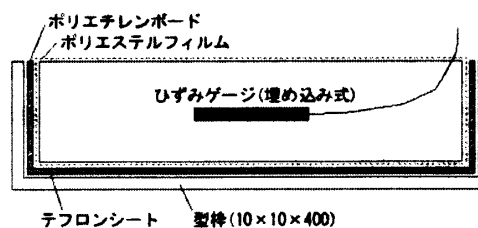


図-1 自己収縮ひずみの測定方法

離：100mm）を供試体中心部に取り付けを行った。材齢 24 時間で脱型し、外部からの水分の侵入および水分逸散が生じないようにシールし、測長を続けた。

なお、ペーストの線膨張係数は打込み直後から大きく変化して、その値が不明であることから、水和熱による温度補正は行わなかった。しかし、供試体内部の温度の影響を確認するため供試体中心部に熱電対を配置した。

表-4 基準モルタルの配合

水セメント比 (%)	単位置量(kg/m ³)			
	水	セメント	細骨材	混和剤
30	298	1005	1005	3.01
50	256	512	1536	0

表-5 凝結試験

供試体	W/C (%)	繊維長 (mm)	添加量 (Vol%)	使用繊維
ベース	30	12	0	—
PP-27			0.13	PP-27
PP-65				PP-65
PP-NC				PP-NC
NY-19				NY-19
ベース	50	12	0	—
PP-0.13			0.13	PP-27
NY-0.13				NY-19
PP-0.26			0.26	PP-27
NY-0.26				NY-19

2.2 凝結試験

モルタルに使用した材料は、普通ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm³，比表面積：3370 cm²/g），細骨材（君津市産山砂，表乾密度：2.61g/cm³，吸水率：1.84%，粗粒率：2.62），高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系），である。繊維は表-1 に示した PP-43，NY-15 以外のものを使用した。

配合条件は表-4 に示すように，W/C=30%においては S/C=1.0 とし高性能 AE 減水剤を W×1% 添加した。W/C=50%においては S/C=3.0 とし高性能 AE 減水剤は添加しなかった。

繊維はペーストに対する体積比で0.13%添加，繊維長は 12mm を基本とした。この添加量と繊維長は先ほど述べた剥落対策¹⁾の添加量を参考にした値である。

供試体の種類を表-5 に示す。繊維の材質と，繊維径，親水性の有無（PP 繊維），添加量を変化させた。自己収縮試験との比較のため水セメント比が 30%のシリーズと，一般的な配合を想定

した水セメント比が 50%のシリーズを行った。供試体は各パラメータに対して 1 体である。

JIS A 1147 に準じて試験を行った。試験を簡便化するために，コンクリートから呼び寸法 4.75mm の網ふるいで粗骨材粒を除去したモルタルではなく，モルタルを直接練り混ぜて凝結試験を行った。練混ぜはホバート型ミキサーを使用し，セメントと水を投入し 60 秒，細骨材を投入し 60 秒，その後繊維を投入し 90 秒間行った。

3. 自己収縮試験結果および考察

材齢 24 時間までの自己収縮試験結果を図-2 に示した。それぞれ，ベースペーストとの比較を行っている。これらの図より，繊維を添加することで親水性処理の施された繊維以外において収縮が抑制されていることがわかる。

一般的に自己収縮試験で使用されている埋め込みゲージは弾性係数が 3000MPa 程度である。弾性係数が 1.5MPa と非常に小さい低弾性ひずみゲージを使用したことによって打ち込み直後からの収縮ひずみが計測できた。打ち込み直後からの収縮の計測を行なった報告は少ないため，供試体内部の温度変化とあわせて低弾性ひずみゲージの測定結果について考察を行う。

また著者らは既報²⁾においてプラスチック収縮ひび割れ試験を行い，温度・湿度が異なるものの，材齢約 3 時間でのひび割れ発生を確認している。また図-3 に見られるように，水和反応による明らかな温度上昇が始まる前であることも考慮に入れ，材齢 3 時間までの収縮ひずみとそれ以降の収縮ひずみを分けて考察を行う。

3.1 低弾性ひずみゲージによる計測結果の解釈

本試験では水和熱による温度補正を行わなかったが，温度変化は当然計測されたひずみに影響を及ぼす。図-3 にひずみと試体内部温度を示す。打ち込み直後の供試体温度は 22℃前後であった。

材齢 3 時間程度までは温度変化はほとんど生じておらず，水和熱の影響が無いひずみの測定

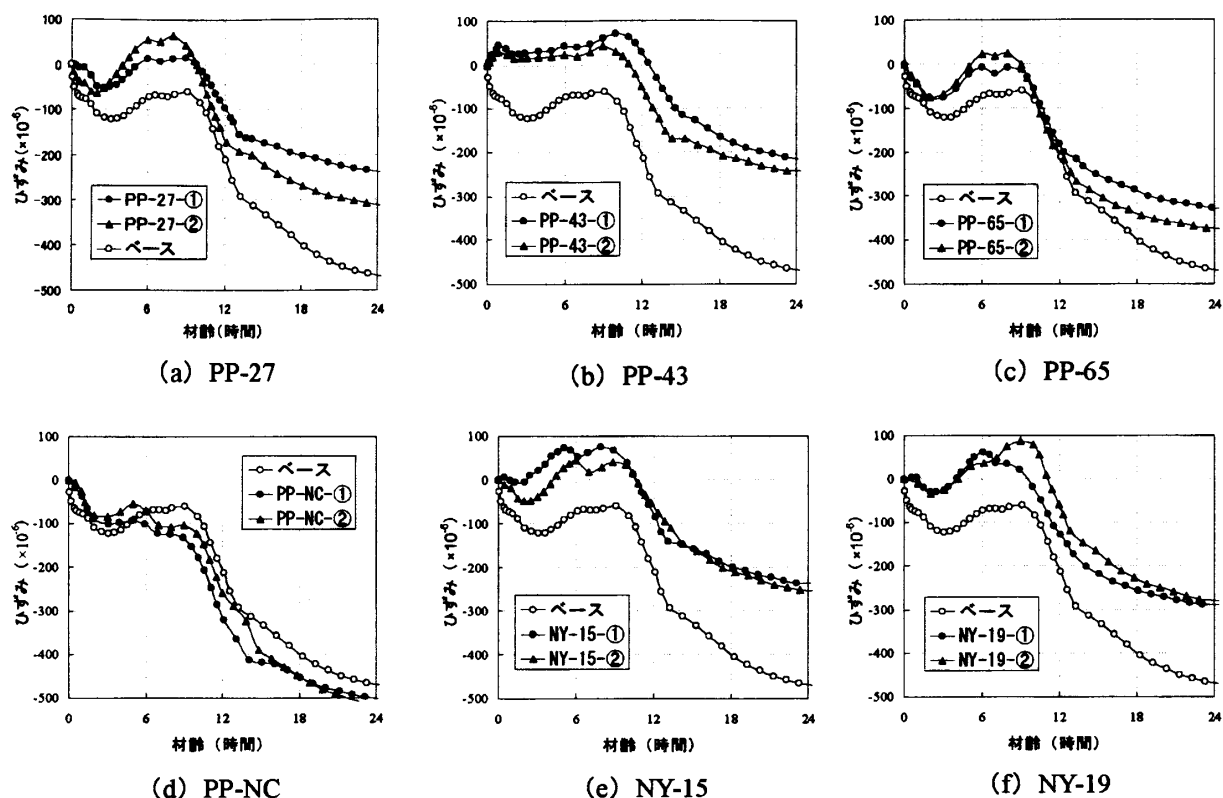


図-2 自己収縮試験結果 (ひずみ)

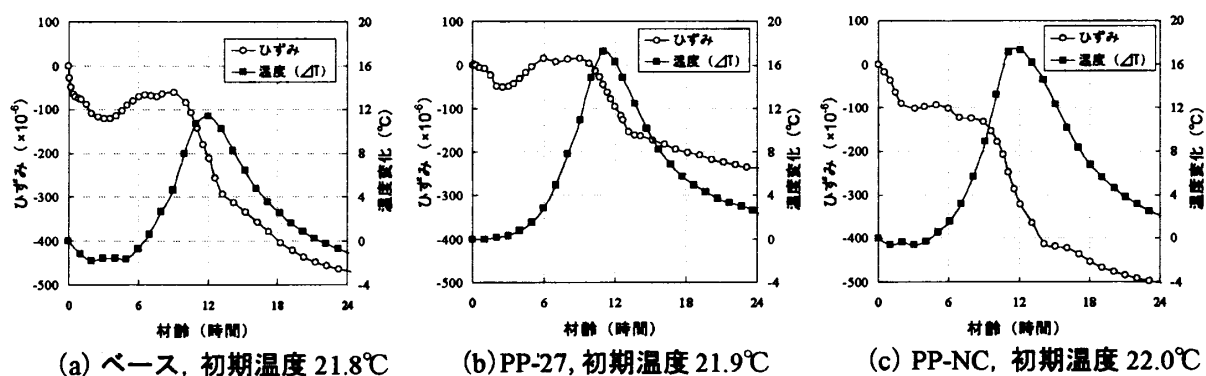


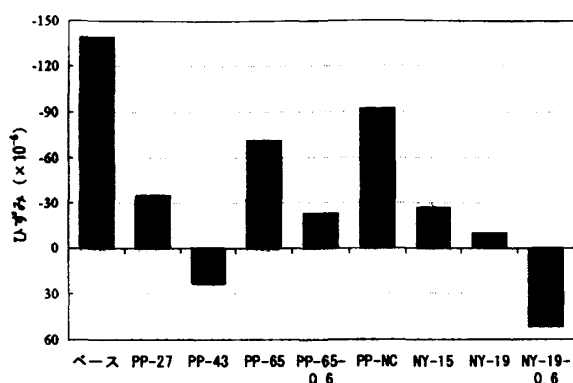
図-3 自己収縮試験結果 (供試体内部温度とひずみ)

がされたと考えている。しかし、繊維を添加しない場合のみ、打込み後に2℃程度の温度低下が見られた。この影響で収縮ひずみがほかのものより若干大きくなっていると考えられる。温度低下の原因は現時点では不明である。

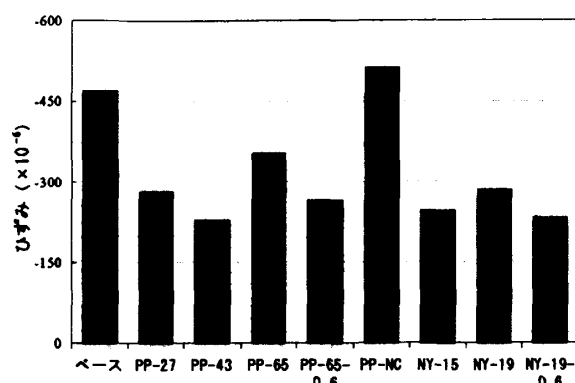
打込み後、ペーストの温度が上昇する前に、膨張ひずみを示しているものもある。堀田らは、同様の試験によって、ペーストの練混ぜ直後から C_3S の反応が膨張ひずみを示すことを指摘している⁵⁾。ペーストの体積変化はいくつかの要因の複合の結果であり、繊維の添加によってペー

ストの収縮成分が抑制されたことによって、膨張ひずみを示したと考えている。

材齢3時間以降では図-3より、繊維を添加することによって温度上昇が大きくなっていることがわかる。繊維添加とベースの上昇温度の差は5℃程度である。親水性処理の無いPP繊維は、ブリーディングの抑制効果も無く²⁾、本研究では収縮ひずみの抑制効果や凝結に及ぼす影響もほとんど見られない。それでもベースペーストに比べて温度上昇が大きくなっていることから、繊維自体の比熱の違いが影響している可能性も



(a) 材齢 3 時間



(b) 材齢 24 時間

考えている。

材齢 6 時間あたりからひずみが膨張側に変化している。これは、水和熱の影響が顕著に表れたものである。温度が上昇すると、ペーストとゲージの抵抗素子の熱膨張係数の差が見かけひずみとして計測値に表れる。打込み直後のペーストの熱膨張係数は不明である。従って、ペーストの温度が大きく変動している時間帯では、ひずみの計測値の絶対値を用いての考察は行わない。ペーストの温度が外気温に近づいた材齢 24 時間におけるひずみの絶対値を用いて繊維の効果を検討することとした。

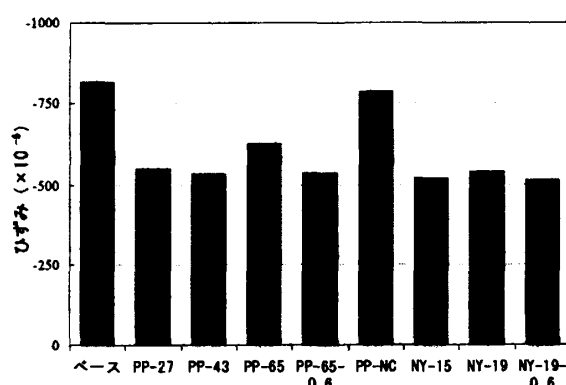
3.2 材齢 3 時間までの収縮

図-4 (a) に材齢 3 時間での収縮ひずみを示す。この図から、繊維により大幅に収縮が抑制されていることがわかる。特に PP-43 と NY-19-0.6 においては打ち込み後から継続して膨張ひずみが計測された。

ポリプロピレン繊維、ナイロン繊維とともに添加量を増やすことにより抑制効果が增大している。親水性処理の施された繊維の中で繊維径が最も大きい PP-65 が抑制効果の少ない結果となった。繊維の本数および量が多いほど収縮抑制効果が大きくなった。

3.3 材齢 3 時間以降の収縮

図-4 (b) に材齢 24 時間での収縮ひずみを示す。材齢 3 時間の時と同様に、繊維の添加により大幅に収縮が抑制されている。また、親水性処理が無い繊維に関してはベースよりも大きな値となった。



(c) 材齢 7 日

図-4 自己収縮試験結果 (収縮ひずみ)

PP 繊維の親水性は、ペーストの収縮抑制に大きな影響を及ぼしている。図-2 (d) を見ても、PP 繊維に親水性が無い場合は、ペーストの収縮抑制効果はほとんど無い。繊維が親水性を持つ場合は、周囲の自由水が捕捉され、ペースト内部の相対湿度低下が抑制されて自己乾燥に起因する収縮を抑制したと考えている。プラスチック収縮ひび割れは自己乾燥と水分逸散によって引き起こされる³⁾ため、この効果は繊維がプラスチック収縮ひび割れを抑制するひとつの要因であると考えている。水分が逸散する条件では、繊維の水分捕捉効果がさらに大きな収縮抑制効果を発揮すると考えている。

ポリプロピレン繊維の中で同材質の PP-65 と PP-43、ナイロン繊維の NY-19 と NY-15 をそれぞれ比較すると、繊維径が細いものほど収縮を抑えていることがわかる。つまりアスペクト比が大きくなるほど収縮抑制効果が大きくなる。

繊維の添加量を多くすると収縮抑制効果は大

表-6 凝結試験結果

供試体	W/C (%)	凝結時間(分)	
		始発	終結
ベース	30	295	420
PP-27		305 (+10)	435 (+15)
PP-65		325 (+30)	455 (+35)
PP-NC		300 (+5)	420 (±0)
NY-19		300 (+5)	450 (+30)
ベース	50	350	490
PP-0.13		330 (-20)	485 (-5)
NY-0.13		355 (+5)	520 (+30)
PP-0.26		350 (+0)	525 (+35)
NY-0.26		320 (+30)	515 (+25)

きくなった。しかし、それよりは、繊維径や長さを変化させる方が効果は大きいと考えている。

図-4 (c) に材齢 7 日での収縮ひずみを示す。繊維により収縮が抑制されている。しかし材齢 24 時間以降は、ひずみの増加に繊維添加の有無の影響はほとんど無い。従って、繊維添加による収縮抑制効果は材齢 24 時間以内に卓越する現象であるといえる。

4. 凝結試験結果および考察

表-6 に凝結試験の結果を示す。繊維添加によって凝結が遅延されたことがわかる。特に終結時間を遅延させている。添加量や材質の違いによる影響は見られなかった。PP-0.13 では凝結が早まった。親水性処理の無い繊維に限っては凝結時間がベースとほとんど変わらなかった。

以上のことを踏まえ、繊維の親水性が凝結に影響を与えていると考えた。著者らは既報²⁾において、親水性処理が施されている繊維のブリーディング抑制効果を確認している。どちらの現象も、繊維が周囲の自由水を捕捉することにより生じていると考えている。繊維が自由水を捕捉することにより材料分離が抑制されることに伴い、凝結試験を実施する領域のペーストの水セメント比の低下が抑制され、凝結が遅延したと考えている。

5. まとめ

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 少量の合成短繊維によりペーストの打ち込み後の収縮が抑制された。しかし、PP 繊維が親水性を持たない場合は、収縮抑制効果がほとんど無かった。収縮抑制効果は添加量が増え、径が細くなるほど大きくなった。
- (2) 少量の合成短繊維の添加により凝結が遅延された。しかし PP 繊維が親水性を持たない場合は、凝結遅延はほとんど生じなかった。
- (3) 繊維の親水性により繊維周囲の自由水が捕捉され、ペースト内部の相対湿度低下が抑制されて自己乾燥に起因する収縮を抑制したと考えた。凝結の遅延作用も、繊維が水分を捕捉することによる、との考察を示した。

【謝辞】本研究は、平成 18 年度の前田記念工学財団研究助成により実施しました。

参考文献

- 1) 細田 暁, 菅野貴浩, 石橋忠明: 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報告集, Vol.25, No.1, pp.275-280, 2003
- 2) 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報告集, Vol.28, No.1, pp.299-304, 2006
- 3) Parvis Soroushian, Faiz Mirza, Abdulrahman Alhozaimy: Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, ACI Material Journal, Vol.9, No.5, pp.553-560, Sep-Oct, 1995
- 4) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 2002
- 5) 堀田智明, 名和豊春, 大沼博志, 森吉昭博: セメントペーストの自己収縮に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.711-715, 1999