

論文 ポリプロピレン短繊維補強コンクリートのフレッシュおよび硬化性状

平石 剛紀*¹・坂田 昇*²・矢吹 増男*³・細田 常正*⁴

要旨: 最近、コンクリートの剥落事故が問題になっているが、その防止対策の一つとして、繊維補強によるコンクリートの靱性およびひび割れ発生後の耐力の向上が考えられる。本研究では、ポリプロピレン短繊維補強コンクリートの適用に着目し、繊維形状の違いが補強効果に及ぼす影響について検討を行った。実験の結果、繊維の形状を波型に改良することにより、コンクリートの靱性が大きく向上することを明らかにするとともに、繊維の表面処理および繊維径の違いが、フレッシュ性状および強度特性に与える影響を確認した。

キーワード: 繊維補強コンクリート, ポリプロピレン繊維, 繊維形状, 曲げ靱性

1. はじめに

最近、トンネル覆工コンクリートや高架橋コンクリートの剥落が相次いで起こり、大きな社会問題となっている。これらコンクリートが剥落する理由の一つとして、コンクリートが靱性に乏しい材料であることが考えられる。一方、コンクリートを短繊維で補強することによってコンクリートの靱性が改善されることは、これまで多くの研究がなされており、広く知られるところである¹⁾。

コンクリート補強用短繊維の中でも、ポリプロピレン繊維は、繊維混入によるコンクリートの流動性の低下が少なく、かつ、アジテータ車への投入の際に分散機を必要としないなど施工性に優れた材料であるが、その補強効果は、他の繊維（鋼繊維やピニロン繊維など）に比して小さいことが知られている。

そこで本論文では、ポリプロピレン短繊維補強コンクリートの補強効果の改善を目的として、繊維形状、表面処理剤および繊維径の違いがコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響について検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に、使用した繊維の詳細を表-2に示す。繊維は、形状、表面加工（以下、エンボス加工と記す）、表面処理剤、繊維径の異なるポリプロピレン繊維6種類と、比較用のピニロン繊維・鋼繊維各1種類の計8種類を実験に供した。

ポリプロピレン繊維は、コンクリートとの十分な付着を確保するため、繊維表面に機械的な凹凸加工（エンボス加工）を施すが、本実験では、エンボス加工の強加工および弱加工の2種類を用いて実験を行った。また、撥水性を有するポリプロピレン繊維は、コンクリート用短繊維として用いる場合、繊維の浮上がり防止や、コンクリートとの付着向上を目的として、表面処理剤により繊維表面に親水性を付与させる必要がある。本実験では、表面処理剤として、多価アルコール系（以下、AL処理剤と記す）、エチレンオキサイド系（以下、EO処理剤と記す）の2種類を使用し実験を行った。

実験に用いたポリプロピレン繊維の形状を

*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員（正会員）

*2 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 主管研究員 工博（正会員）

*3 萩原工業（株）ハギライン事業部 ハギライン商品開発グループ リーダー 工修

*4 萩原工業（株）ハギライン事業部 ハギライン商品開発グループ

表-1 使用材料

使用材料	記号	概要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3320cm ² /g
混和材	LP	石灰石微粉末	密度: 2.73g/cm ³ , 比表面積: 3500cm ² /g
細骨材	S	新潟産山砂	表乾密度: 2.60kg/l, 吸水率: 1.88% 粗粒率: 2.53
粗骨材	G	八王子産硬質砂岩碎石 (2005)	表乾密度: 2.65kg/l, 吸水率: 0.67%, 粗粒率: 6.70, 最大寸法: 20mm
短繊維	PPF	ポリプロピレン繊維	密度: 0.91g/cm ³ , 繊維長: 30mm
	VF	ビニロン繊維	密度: 1.30g/cm ³ , 繊維長: 30mm
	SF	鋼繊維	密度: 7.8g/cm ³ , 繊維長: 30mm
混和剤	AD	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系(標準形)
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム

表-4 試験項目

試験項目	試験方法
スランブ(SL)	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	温度計により計測
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JSCE-G502-1988
引張強度	JIS A 1113
曲げ強度 (曲げタフネス)	JSCE-G552-1983
せん断強度	JSCE-G553-1983

表-2 繊維の仕様

NO.	繊維種類	繊維長	形状	繊維径*	エンボス加工	表面処理剤
1	PPF	30mm	直線型	6400d	強	多価アルコール系 (AL処理)
2			波型		弱	
3			直線型		強	
4			波型			
5			直線型	9000d		
6			波型			
7	VF		直線型	4000d	-	-
8	SF		両端フック型	0.6mm	-	-

* ; 1d (デニール) = 1g/9000m (繊維9000mの質量が1g)

直線型 (N)



波型 (W)



図-1 ポリプロピレン繊維の形状

表-3 コンクリートの配合

繊維種類	繊維混入量	W/C (%)	Air (%)	s/m (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					VIS (W×%)	AD,SP (C×%)
						W	C	LP	S	G		
無混入	-				46.0	175	319	-	812	972	-	-
PPF	0.5vol%	55	4.5	53.1	49.1	183	333	-	851	899	4.6	-
	1.0vol%										9.1	-
	1.5vol%										13.7	-
VF	1.0vol%										13.0	-
SF	1.0vol%				53.7	195	355	-	905	794	78.0	-
無混入	-	45	4.5	52.4	44	160	356	-	781	1012	-	-
PPF	1.0vol%				47.2	168	374	-	820	936	9.1	-
無混入	-	35	4.5	40.8	44.7	175	500	117	673	848	-	-
PPF	1.0vol%										9.1	0.05

容積を変化させて、所定の流動性が得られるよう修正した。なお、ビニロン繊維を用いた配合およびポリプロピレン繊維の混入量の違いによる配合の修正は行わず、ポリプロピレン

図-1に示す。繊維の形状は、市販されている直線型と、その形状を波型に改良したものの2種類とした。

2.2 コンクリートの配合

実験に供したコンクリートの配合を表-3に示す。W/C=55%のコンクリートは目標スランブ 8±2.5cm, W/C=45%のコンクリートは目標スランブ 12±2.5cmとした。また、W/C=35%のコンクリートは目標スランブフロー60±5cmとした。空気量はすべての配合において、4.5±1.0%を目標値とした。

繊維を1.0vol%混入する配合は、繊維無混入の配合を基に、モルタルを構成する材料(水、セメント、砂)の容積割合を一定とし、粗骨材

繊維1.0vol%混入配合と同じとした。また、繊維はコンクリートの外割として使用した。

2.3 練混ぜ方法

練混ぜには、容量100Lの強制2軸ミキサを使用し、練混ぜ量は90Lとした。W/C=55%のコンクリートについては、繊維を除く材料を一括投入し60秒間練り混ぜた後、ポリプロピレン繊維およびビニロン繊維の場合は繊維を一括投入し30秒間、鋼繊維の場合は30秒間ミキサを回転させながら投入し、投入後さらに30秒間練り混ぜた。高性能AE減水剤を用いたW/C=45, 35%のコンクリートについては、繊維を投入する前の練混ぜ時間を90秒とし繊維投入方法はW/C=55%と同じとした。

表-5 検討ケース

シリーズ NO.	ケース名	W/C	繊維種類	繊維の詳細*	混入率 (vol%)
1	55-0	55	PPF	-	-
	55-PW			W-64-弱-AL	1.0
	55-PN			N-64-強-AL	
	45-0			-	
	45-PW	W-64-弱-AL			
	45-PN	N-64-強-AL			
	35-0	35	PPF	-	-
	35-PW			W-64-弱-AL	1.0
2	55-0	55	PPF	-	-
	PW6400			W-64-強-EO	1.0
	PW9000			W-90-強-EO	
	PN6400			N-64-強-EO	
	PN9000			N-90-強-EO	
	55-PN			N-64-強-AL	
	55-0			-	
3	PW6400-0.5	55	PPF	W-64-強-EO	
	PW6400-1.0			W-64-強-EO	1.0
	PW6400-1.5			N-64-強-EO	1.5
	PN6400			N-64-強-EO	1.5
	VF			-	1.0
	SF			-	1.0
	55-0			-	-

* ; 表-2 の記載順に示す。(N:直線型, W:波型)

表-6 ポリプロピレン繊維の引張強度

形状	繊維径	エンボス加工	引張強度 (N/mm ²)
直線型	6400d	強加工	446
波型		弱加工	420
波型		強加工	382

2. 4 検討ケースおよび試験項目

試験項目を表-4に示す。硬化コンクリートの試験材齢は7日および28日とした。検討ケースを表-5に示す。実験は3シリーズに分けて実施し、①繊維形状、②繊維形状・表面処理剤・繊維径、③繊維混入量について、それぞれがフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響を検討した。また、シリーズ3では、鋼繊維とピニロン繊維との比較についても併せて検討を行った。

3. 繊維形状の影響 (シリーズ1)

3. 1 検討要因および試験条件

シリーズ1では、繊維形状の違いがフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響を、W/C=55, 45, 35%のコンクリートについて検討した。3種類の繊維の引張強度試験結果を表-6に示す。波型繊維のエンボス加工を直線型繊維と同じ強加工とした場合、繊維の引張強度が低下することが分かる。本シリーズでは、形状の影響のみ

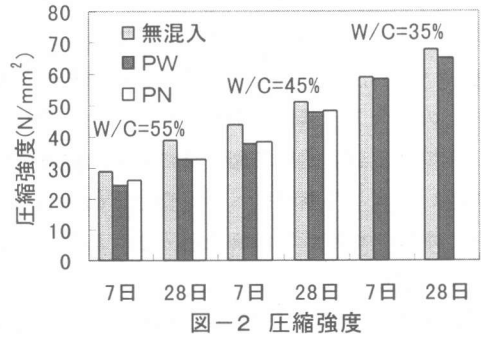


図-2 圧縮強度

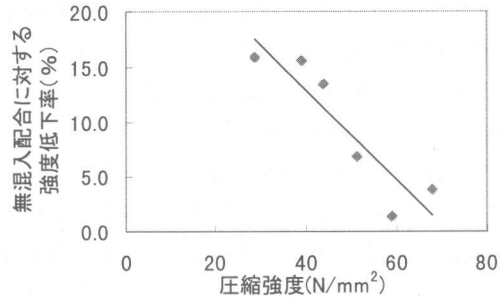


図-3 圧縮強度と強度低下率の関係

を検討の目的としたことから、比較する繊維間での強度差を小さくするため、使用する波型繊維の表面に施すエンボス加工を弱加工としたものを用いて実験を行った。

また、事前試験において、繊維の表面処理剤として、EO処理剤を用いた場合、混和剤にポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用すると、空気連行助剤を添加してもコンクリートに所定の空気量を確保することが困難となる結果となった。そこで、本シリーズでは、W/C=55, 45, 35%について試験を同一条件で行うため、高性能AE減水剤と併用しても所定の空気量を確保できる、AL処理剤を使用した繊維を用いて実験を行った。本シリーズでの繊維混入量は1.0vol%とした。

3. 2 試験結果および考察

ポリプロピレン繊維を1.0vol%混入させた場合、目標スランプを満すためには、繊維形状に関係なく、W/C=55, 45%ともに、基本配合に対して8kg/m³単位水量を増す必要があった。単位水量の増加量が、繊維形状の影響を受けな

クリートの流動性を損なわないことが分かった。また、W/C=35%のコンクリートでは、波型繊維 1.0vol%混入による流動性の低下は見られず、同一の配合で目標値を満たした。

圧縮強度試験結果を図-2に示す。繊維形状の違いによる圧縮強度への影響は認められないが、ポリプロピレン繊維を混入させることにより圧縮強度が低下する結果となった。しかし、図-3に波型ポリプロピレン繊維を 1.0vol%混入した場合の圧縮強度低下率を示すが、圧縮強度の低下率は、高強度になるほど小さくなることが分かった。圧縮強度低下の原因については、繊維の表面処理剤の影響と考えられた。詳しくは、シリーズ2で考察する。

引張、曲げおよびせん断強度試験結果を図-4に示す。繊維を混入することにより、各種強度は圧縮強度同様、強度の低い領域で低下する傾向が認められた。しかし、比較的強度の大きいW/C=45%、材齢28日では、各種強度ともに繊維を混入したものの方が大きくなった。また、繊維形状の違いによる各種強度への影響はほとんど認められなかった。

図-5に曲げ靱性係数を示す。W/C=55, 45%ともに、材齢7日で波型繊維は直線型繊維に比べ3~4割程度低い値であったが、材齢28日では同等の値となった。この理由としては、繊維を波型にしたことによる引抜け抵抗の向上効果と、エンボス加工を弱めたことによる引抜け抵抗の低下要因との影響度の差によるものと考えられた。また、曲げ試験供試体の破断面を目視観察すると、波型繊維は直線型繊維に比べ引抜けを生じている繊維が多く、曲げによる破壊が繊維強度に支配されていないことが分かった。そこで、シリーズ2では、波型繊維のエンボス加工を強加工としたものを用いて実験を行った。

4. 形状・表面処理剤・繊維径の影響

(シリーズ2)

4.1 検討要因および試験条件

シリーズ1の結果を受けて、直線型繊維と同

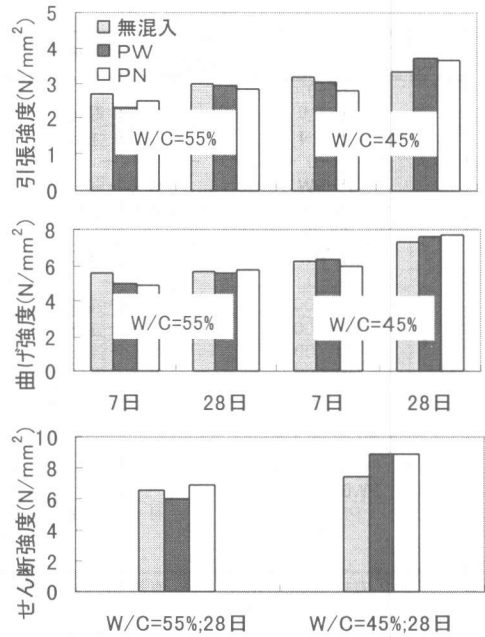


図-4 引張・曲げ・せん断強度試験結果

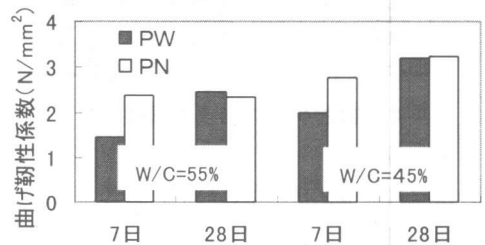


図-5 曲げ靱性係数

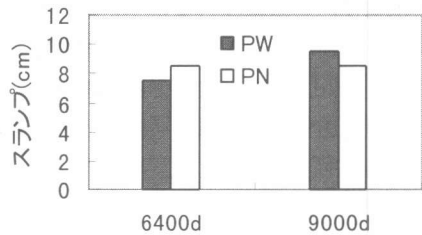


図-6 スランプ試験結果

じ強加工のエンボス加工を施した波型繊維を製作し、W/C=55%のコンクリートについて、E O処理剤を使用し実験を行った。さらに、繊維径を 6400, 9000 デニールの2水準とし、繊維径がフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響についても併せて検討を行った。実験に供した配合は、シリーズ1の配合と同じとした。

4. 2 試験結果および考察

コンクリートのフレッシュ性状はスランプ・空気量とも目標値を満たすものであった。スランプ試験の結果を図-6に示す。波型繊維のエンボス加工を強加工とすることで、波型繊維の断面が扁平になり、繊維の表面積が増加し、コンクリートの流動性を損なうことが懸念されたが、その影響は見られなかった。

表-7に圧縮強度試験結果を示す。シリーズ1とは異なり、繊維無混入の配合に比べ繊維を混入することで、強度低下はほとんど見られず、同等の結果が得られた。PN6400と55-PNの関係を考慮すると、シリーズ1における、繊維混入による圧縮強度の低下の原因としては、AL処理剤の使用が考えられた。

引張、曲げおよびせん断強度試験結果を図-7に示す。繊維混入・無混入で引張、曲げおよびせん断強度はほぼ同じであったが、繊維によっては強度が増大するものもあり、6400dの繊維では、引張、曲げおよびせん断のすべての強度において無混入に比べ大きくなった。

図-8に曲げ靱性係数を示す。形状を波型にすることで靱性が1.3倍程度向上する結果であった。これは、波型繊維のエンボス加工を直線型繊維と同じとすることで、繊維とコンクリートとの界面の引抜け抵抗が同一となり、さらに、繊維を波型にしたことで、抜けに対する抵抗力が向上したことによるものと考えられた。繊維径については、直線型繊維、波型繊維とも9000dよりも6400dの方が高い靱性を示した。

本シリーズの結果より、ポリプロピレン繊維の形状を波型にすることは、靱性の向上に有効であることが明らかとなった。

5. 他の繊維との比較および混入量の影響 (シリーズ3)

5. 1 検討要因および試験条件

シリーズ2においてコンクリートの靱性改善に最も有効であった波型-6400d-エンボス大-EO処理剤のポリプロピレン繊維を用いて、鋼

表-7 圧縮強度

シリーズ	ケース名	繊維の詳細	圧縮強度(N/mm ²)	
			材齢7日	材齢28日
2	55-0	—	28.8	39.1
	PW6400	W-64-強-EO	27.9	38.2
	PW9000	W-90-強-EO	29.2	37.0
	PN6400	N-64-強-EO	30.5	39.3
	PN9000	N-90-強-EO	29.9	38.7
1(参考値)	55-PN	N-64-強-AL	26.1	32.9

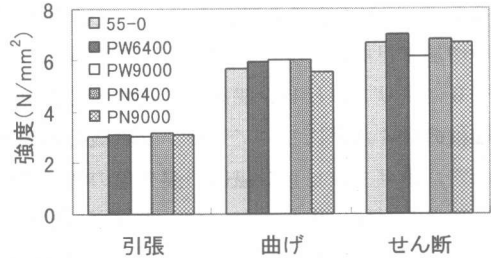


図-7 引張・曲げ・せん断強度結果

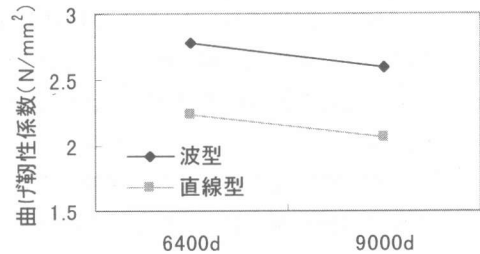


図-8 曲げ靱性係数

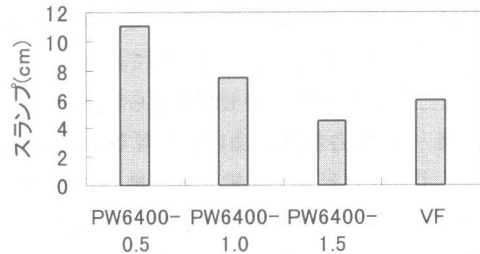


図-9 スランプ試験結果

繊維およびビニロン繊維との比較実験を、W/C=55%について行った。ポリプロピレン繊維は混入量を0.5, 1.0, 1.5vol%の3水準とし、その他の繊維は1.0vol%の1水準とした。本シリーズにおいて鋼繊維を混入させた配合は、スランプの目標値 8 ± 2.5 cm を満たすために配合修正を行い、ビニロン繊維を混入させた配合は、配合の修正を行わず、ポリプロピレン繊維と同一の配合として実験を行った。また、ポリプロピレン繊維の混入量の変化についても配合修正

は行わず混入量1.0vol%の配合で実験を行った。

5. 2 試験結果および考察

鋼繊維を1.0vol%混入させたコンクリートにおいて目標スランプを満たすためには、基本配合に対し単位水量を20kg/m³増やす必要があった。なお、前述のとおり、ポリプロピレン繊維を1.0vol%混入させたコンクリートでは、8kg/m³の増加で目標スランプを得ることができた。図-9にポリプロピレン繊維の3水準とビニロン繊維の計4水準についてスランプ試験の結果を示す。ポリプロピレン繊維の混入量の増加に伴いスランプ値は小さくなった。ポリプロピレン繊維とビニロン繊維では、同一混入率1.0vol%で比較すると、スランプ値はポリプロピレン繊維の方が大きい結果であった。以上の結果より、ポリプロピレン繊維は、鋼繊維、ビニロン繊維に比べ混入による流動性の低下が小さいことが明らかとなった。

圧縮強度試験結果を表-8に、引張・曲げ・せん断強度試験結果を図-10に示す。ポリプロピレン繊維を混入することによる各種強度への影響はほとんど見られなかった。ビニロン繊維は、曲げ・せん断強度において、鋼繊維は、引張・曲げ・せん断強度について繊維を混入することにより強度の向上が認められた。

図-11に各繊維の曲げ靱性係数の結果を示す。ポリプロピレン繊維の混入量の曲げ靱性に及ぼす影響は、混入量1.0vol%までは混入量の増加に伴い曲げ靱性係数が増加するが、それ以上では混入量の増加による曲げ靱性の向上はなかった。また、直線型のポリプロピレン繊維を混入したコンクリートの曲げ靱性係数は、ビニロン繊維を混入したものに比して劣るものであったが、繊維形状を波型としたことでビニロン繊維と同等の曲げ靱性を示した。

6. まとめ

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 繊維形状を波型にすることで、コンクリートの曲げ靱性が大幅に向上する。

表-8 圧縮強度結果

繊維	混入量 (vol%)	圧縮強度(N/mm ²)	
		材齢7日	材齢28日
無し	—	28.8	39.1
PW6400	0.5	29.7	39.7
	1.0	29.5	38.8
	1.5	28.2	35.7
VF	1.0	32.0	39.8
SF	1.0	29.9	38.3

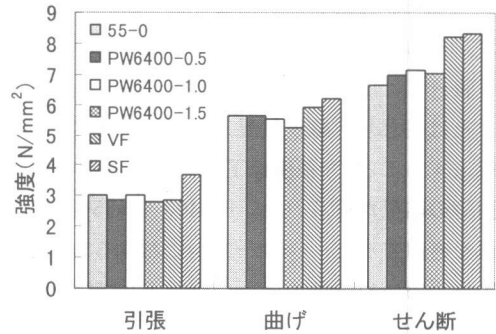


図-10 引張・曲げ・せん断強度結果

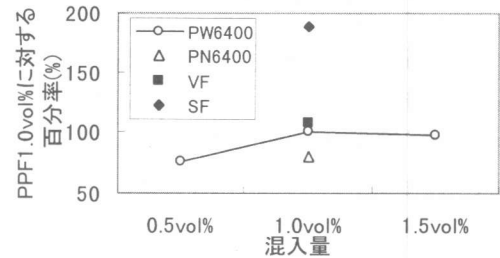


図-11 曲げ靱性係数

- (2) 繊維の表面処理剤によっては圧縮強度が低下するものがある。ただし、高強度領域ではその程度は小さい。
- (3) コンクリートの曲げ靱性には、繊維表面のエンボス加工の度合いが大きく影響する。
- (4) 繊維の混入量を同一とした場合、目標スランプを得るための単位水量は、ビニロン繊維・鋼繊維に対しポリプロピレン繊維が最も小さい値とすることができる。

今後は、本繊維を用いて実際の剥落状況に近い直接引張試験などを実施し、性能を検討していく予定である。

参考文献

- 1) たたとえば(社)土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)，1983 など