

論文 剝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

平石 剛紀*¹・坂田 昇*²・林 大介*¹・山村 正人*³

要旨:本研究では、コンクリートの剝落防止を目的として、有機系短繊維で補強したコンクリートについて実験的な検討を行った。その結果、コンクリートの剝落防止には使用する繊維の強度やヤング係数よりも繊維の引抜けに対する抵抗性が大きく影響すること、繊維径を細くしてひび割れ面に含まれる繊維の表面積を増加させることで、少ない混入率でも剝落防止効果を付与できることを明らかにした。

キーワード:繊維補強コンクリート, 剝落防止, 有機系繊維, 繊維径, ヤング係数

1. はじめに

近年、トンネル覆工コンクリートや高架橋コンクリートの剝落が相次いで起こり、大きな社会問題となっている。コンクリートの剝落は、初期欠陥や鉄筋腐食等によって発生したひび割れが進展することにより生じる。既設構造物に対しては、これら剝落を防止するため連続繊維シートや鋼板接着等の補修工法の研究¹⁾が盛んに行われており、今後も、これらの補修工法は多くの構造物に適用されると考えられる。

一方、新設の構造物については、建設時に適切なコンクリート剝落対応策を講じることで、構造物の長寿命化を可能とし、さらに、維持管理の簡略化が図れるなど、ライフサイクルコストの削減が可能であると考えられる。しかし、先に述べた補修工法に関する研究に比べ、新設時に施す剝落防止の効率的な対策工法に関する研究²⁾は少ないのが現状である。

そこで、本論文では、新設時において構造物に剝落防止性能を付与することを目的として、有機系短繊維を用いた繊維補強コンクリートに関して、適切な繊維の種類・繊維の混入率(シリーズI)、繊維径(シリーズII)について実験的に検討したので、その結果について報告する。

2. 繊維の種類による影響(シリーズI)

2.1 使用材料

シリーズIにおける使用材料を表-1に、使用した繊維の詳細を表-2に示す。試験に供した繊維は、耐腐食特性および施工性に優れた波形ポリプロピレン繊維³⁾(以下、PFと記す。)と直線形ビニロン繊維(以下、VFと記す。)の2種類の有機系繊維とした。

2.2 検討ケースおよびコンクリート配合

シリーズIでは、2種類の繊維を用いて、それぞれの繊維混入率を0.2, 0.35, 0.5vol%の3水準とし、繊維を用いないコンクリート(以下、基本配合と記す。)を加えた合計7ケースの剝落防止性能について検討した。

実験に供したコンクリートの配合を表-3に示す。なお、表中のケース名は繊維の種類/繊維径/混入率の順で示した。本シリーズでは、水セメント比を48.5%とし、実強度で40N/mm²程度のコンクリートを用いた。コンクリートの目標スランプは12±2.5cmとし、繊維の種類および混入率の変化に伴い、所定の流動性が得られるよう配合を修正した。空気量はすべての配合において、4.5±1.0%となるよう調整した。なお、繊維はコンクリートの外割として使用した。練混

*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE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・LCEグループ グループ長 工博(正会員)

*3 鹿島建設(株)土木設計本部プロジェクト設計部コンクリート構造グループ長(正会員)

表-1 使用材料(シリーズ I)

使用材料	記号	摘要	
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	富士川水系川砂	表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 1.47% 粗粒率: 2.93
粗骨材	G	富士川水系川砂利	表乾密度: 2.67g/cm ³ , 吸水率: 1.10% 粗粒率: 6.92, 最大寸法: 20mm
短繊維	PF	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
混和剤	AD	AE減水剤	リグニンスルホン酸系

表-2 繊維の詳細(シリーズ I)

記号	PF64	VF40
繊維種類	PF	VF
繊維径* (真円とした場合の径)	6400d (1.00mm)	4000d (0.66mm)
ヤング係数(N/mm ²)	1.0 × 10 ⁴	2.9 × 10 ⁴
引張強度(N/mm ²)	450	900
1m ³ 当りの理論本数 (本/m ³)	0.2vol%	85446
	0.35vol%	149531
	0.5vol%	213616
		195000
		341250
		487500

*: 1d=1g/9000m(繊維9000mの質量が1g)

表-3 コンクリート配合(シリーズ I)

ケース名	繊維混入量	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AD (C×%)
					W	C	S	G	
基本	—	48.5	4.5	43.5	163	337	787	1034	—
PF64-0.2	0.2vol%							1.82	
PF64-0.35	0.35vol%				167	345	806	997	3.19
PF64-0.5	0.5vol%							4.55	
VF40-0.2	0.2vol%				170	351	854	936	2.60
VF40-0.35	0.35vol%				175	361	878	889	4.55
VF40-0.5	0.5vol%	180	372	903	842	6.50			

表-4 試験項目

試験項目	試験方法
スラブ	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
引張強度	文中参照
曲げ強度 (曲げタフネス)	JSCE-G552-1983
鉄筋膨張圧模擬試験	文中参照

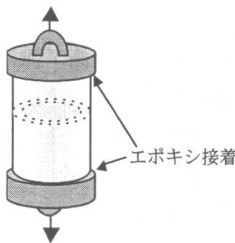


図-1 引張強度試験方法

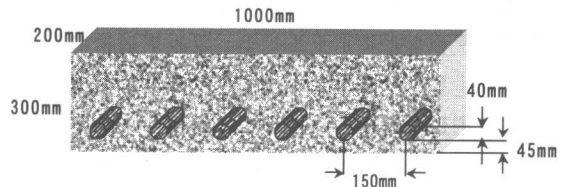


図-2 鉄筋膨張圧模擬試験

ぜは 100L の強制二軸型ミキサを用いて、繊維を除く材料を一括投入し 90 秒間練り混ぜた後、繊維を投入しさらに 30 秒間練り混ぜた。

2. 3 試験項目および試験方法

試験項目を表-4 に示す。各種強度試験用供試体の作製は JSCE-F552 に準じて行い、硬化コンクリートの試験材齢は 28 日とした。曲げ強度試験では、ひび割れ発生後の耐力を評価するために、繊維を混入したケースについて荷重-変位の関係も計測した。引張強度試験方法を図-1 に示す。試験体は寸法がφ100×200mm で中央部に深さ 5mm の切込みを入れたものとした。なお、試験では最大荷重以降も変位制御にて载荷を続け、供試体が破断するまで計測を行った。

鉄筋膨張圧模擬試験の概要を図-2 に示す。試験体は寸法が 200×300×1000mm の梁を模擬した形状であり、かぶり 45mm とした鉄筋を模擬

してφ40mm の孔を 150mm 間隔であけた構造とした。試験は、試験体を材齢 28 日まで保湿養生した後、実構造物での鉄筋腐食に起因するコンクリートの剥落状況を、供試体のφ40mm の孔に石灰系の静的破碎材(いわゆる膨張材)を充填してコンクリートに膨張圧(引張応力)を加えることで模擬し、48 時間まで経時的にひび割れの発生状況および剥落の有無について確認した。なお、本試験は PF-0.2, 0.35, 0.5 および VF-0.2 の 4 ケースについて実施した。

2. 4 試験結果および考察

各ケースの単位水量を図-3 に示す。図中の数字はスランプの値である。一般に、繊維を混入することでコンクリートの流動性は低下するが、VF は混入率の増加に伴い、必要な単位水量が増加したのに対し、PF は混入率が増加した場合でもスランプの変化はほとんどなく、流動性

を大きく損なうことはなかった。

基本配合に対する各種強度の比率を図-4に示す。各種強度とも繊維を混入することで低下する傾向であった。この理由については明確ではないが、理由の一つとして、繊維の配向に配慮して木植による締固めで供試体を作製したことによる締固め不足が考えられた。そこで、シリーズIIでは供試体作製時に型枠側面を棒状バイブレーターで振動させて締め固めた。

曲げ強度試験における供試体破断面の繊維本数と供試体のたわみ2mmにおける荷重との関係を図-5に示す。ここで、PF-0.5とVF-0.2の繊維本数がほぼ等しい理由としては、両者で繊維径および密度が異なるためである。本来、繊維混入による曲げ補強効果は、荷重-変位曲線で囲まれる部分の面積を用いて曲げ靱性係数を算出し評価を行う。しかし、繊維の混入率が低い場合、ひび割れ発生直後に急激に荷重が減少するため、荷重-変位曲線においてその部分のデータの信頼性が欠けると思われた。また、本研究では剥落防止効果の検討を目的としたため、ある程度変形が生じた状況で評価するのが望ましいと考えた。そこで、本研究では曲げ靱性係数を算出する際に用いる載荷スパンの1/150のたわみ(2mm)における荷重で評価することとした。図に示すように、繊維の種類にかかわらず、破断面の繊維本数とたわみ2mmにおける荷重の間に高い相関関係が認められた。これより、今回使用した2種類の繊維の場合、たわみ2mmにおける繊維1本当たりの曲げ補強効果は、繊維種類によらず同じであると推察された。

引張強度試験における供試体破断面の繊維本数とひび割れ発生後の最大耐力の関係を図-6に示す。図には各ケースとも5体の試験結果の平均を示した。しかし、PF-0.2では4体の供試体がひび割れ発生と同時に破断し、ひび割れ発生後の耐力を測定することができず、1体の試験結果を示した。また、繊維無混入の基本配合では、5体すべてでひび割れ発生時に供試体が破断する結果であった。これより、PF-0.2につ

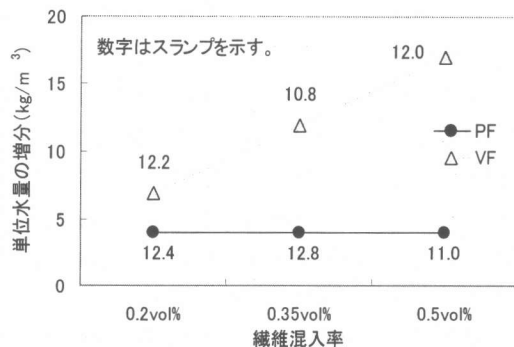


図-3 同一スランプとなる単位水量の増分

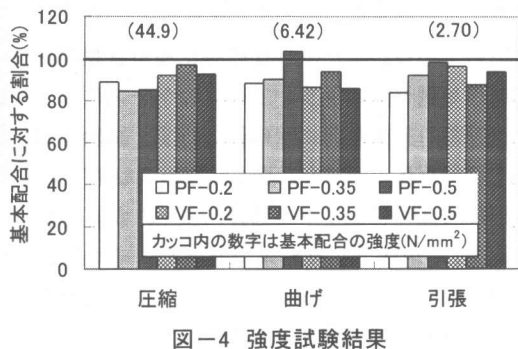


図-4 強度試験結果

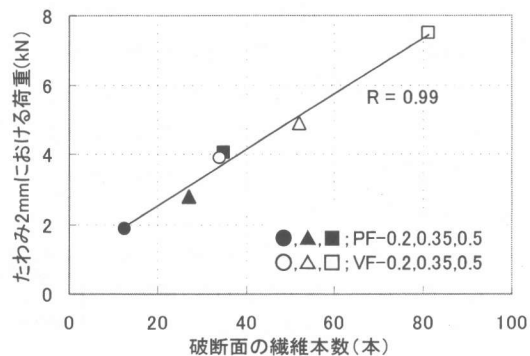


図-5 繊維本数と曲げ補強効果の関係 (シリーズ I)

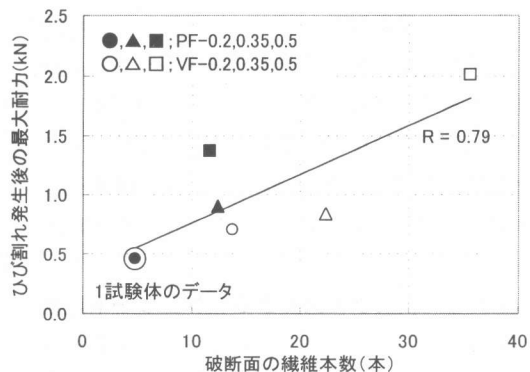


図-6 繊維本数とひび割れ発生後の最大耐力

いては、繊維がひび割れ面を架橋する剥落防止効果が期待できないと考えられた。また、破断面の繊維本数とひび割れ発生後の最大耐力との相関係数は0.79であり、曲げ強度試験に比べ相関係数が小さくなった。この原因としては、供試体寸法が小さく、一軸引張であるためにひび割れ面に混入される繊維本数や繊維の方向のばらつきが大きくなったことが考えられた。

鉄筋膨張圧模擬試験における、試験開始後48時間経過時の状況を写真-1および2に示す。写真-1は基本配合のもの、写真-2はVF-0.2のものである。また、鉄筋膨張圧模擬試験の試験結果を表-5に示す。すべてのケースにおいてひび割れ発生時間に差は見られず、試験開始後7時間程度であった。基本配合およびPF-0.2は、静的破砕材より下の部分（以下、かぶり部と記す。）が落下する結果であった。その他のPF-0.35, 0.5およびVF-0.2のケースは、試験終了までかぶり部が落下することはなかった。この結果は、直接引張試験においてひび割れ発生直後に破断したケースが基本配合とPF-0.2であったことと整合性が見られるものであった。

以上より、PFとVFを比較した場合、同一混入率で剥落防止効果に差が生じるのは、両者の繊維径および密度の違いにより、混入される繊維の本数が異なるためと考えられた。よってシリーズIIでは、PFの繊維径をパラメーターとして検討を行った。

3. 繊維径による影響（シリーズII）

3.1 使用材料

シリーズIIにおける使用材料を表-6に、使用した繊維の詳細を表-7にそれぞれ示す。本シリーズで用いるPFは、シリーズIで使用した繊維に比べて高弾性のものを用い、繊維径を6400d, 3000dおよび1500dの3水準とし実験を行った。

3.2 検討ケースおよびコンクリート配合

検討ケースおよびコンクリート配合を表-8に示す。新タイプのPF(NPF)3種類については、

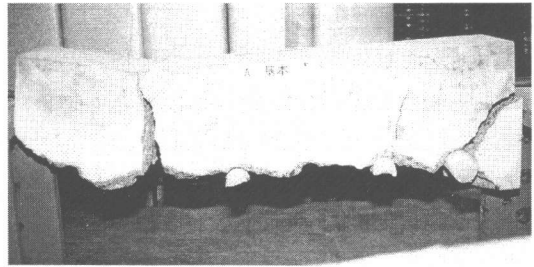


写真-1 剥落実験1(基本配合; 48時間経過)

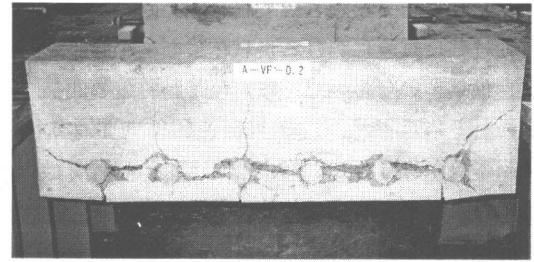


写真-2 剥落実験2(VF-0.2; 48時間経過)

表-5 鉄筋膨張圧模擬試験結果(シリーズI)

繊維種類	(基本)	VF		PF	
		0	0.2	0.35	0.5
混入量	0				
14時間経過	剥落	○	○	○	○
25時間経過	—	○	○	○	○
33時間経過	—	○	剥落	○	○
48時間経過	—	○	—	○	○

○: ひび割れはみられるものの、剥落のない状態

表-6 使用材料(シリーズII)

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ホルトランドセメント	密度: 3.14g/cm ³
細骨材	S	新潟産山砂	表乾密度: 2.63g/cm ³ , 吸水率: 1.51% 粗粒率: 2.57
粗骨材	G	奥多摩産砕石	表乾密度: 2.65kg/cm ³ , 吸水率: 0.65% 粗粒率: 6.64, 最大寸法: 20mm
短繊維	PF, NPF	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
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-7 繊維の詳細(シリーズII)

NO.	繊維種類	繊維径*	ヤング係数	引張強度
PF64	PF	6400d	1.00mm	1.0 × 10 ⁴ N/mm ²
NPF64		6400d	1.00mm	
NPF30	NPF	3000d	0.68mm	1.5 × 10 ⁴ N/mm ²
NPF15		1500d	0.48mm	465N/mm ²
VF40	VF	4000d	0.66mm	2.9 × 10 ⁴ N/mm ²

*: 1d=1g/9000m(繊維9000mの質量が1g)

それぞれ混入率を0.2~0.5vol%の範囲で定めた。また、シリーズIで用いたPFおよびVFとの比較を行うためそれぞれの繊維を0.35vol%

混入したケースについても検討を行った。本シリーズでは、強度レベルを上げ W/C=38.5%とし、実強度で 70N/mm² 程度のコンクリートを用いた。また、繊維の種類・混入率のスランプへの影響を把握するため、繊維を混入したケースでは、繊維以外の配合をすべて同じとし、スランプの目標値は特に設けなかった。空気量はすべての配合において、4.5±1.0%になるよう調整した。なお、繊維はコンクリートの外割として使用し、練混ぜはシリーズ I と同様に行った。

3.3 試験項目

試験項目は表-4と同じである。また、鉄筋膨張圧模擬試験は、基本、NPF30-0.2、NPF30-0.35、NPF15-0.2の4ケースについて実施した。

3.4 試験結果および考察

図-7にコンクリート 1m³ 当たり混入した繊維の表面積の総和とスランプの関係を示す。図に示すように、スランプは同一繊維（ポリプロピレン繊維）において、繊維表面積と相関がある結果となった。

基本配合に対する各種強度の比率の一例を図-8に示す。繊維を混入することで、基本配合に比べ圧縮強度はほぼ同等であったが、曲げ強度、引張強度は増加する結果となった。なお、この結果は、ここに示した以外のすべてのケースについても同様の傾向であった。曲げおよび引張強度が向上した原因については、繊維のヤング係数、繊維径および混入率の影響が明確でないこと、強度レベルの異なるシリーズ I の結果と相反することなどから、今後データ数を増やして検討をする必要がある。

また、引張強度試験では、繊維を混入したすべてのケースにおいて、ひび割れ発生時に破断する試験体はなかった。これは、NPFを0.2vol%混入した場合でも、繊維径を3000dおよび1500dと細くしたことにより混入される繊維本数が増えたことによるものと考えられた。

図-9に曲げ強度試験における破断面の繊維本数とたわみ2mmにおける荷重の関係を示す。図に示すとおり、両者の関係にはシリーズ I で

表-8 検討ケースおよびコンクリート配合

ケース名	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP
				W	C	S	G	繊維	
基本			39.0	155	403	689	1086	-	
PF64-0.35	38.5	4.5	40.0	158	411	701	1059	3.19	C×1.0%
NPF64-0.35								3.19	
NPF64-0.5								4.55	
NPF30-0.2								1.82	
NPF30-0.35								3.19	
NPF30-0.5								4.55	
NPF15-0.2								1.82	
NPF15-0.35								3.19	
VF40-0.35								4.55	

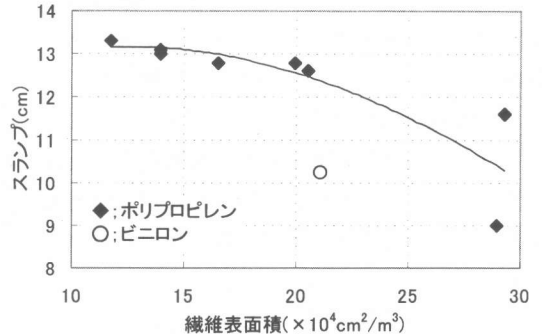


図-7 繊維表面積とスランプの関係

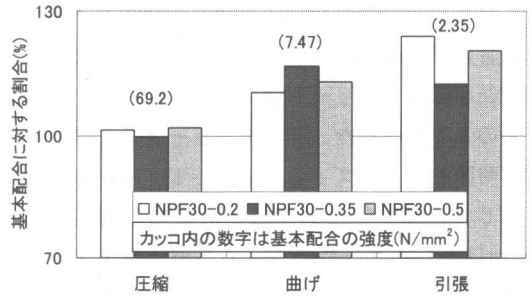


図-8 強度試験結果の一例

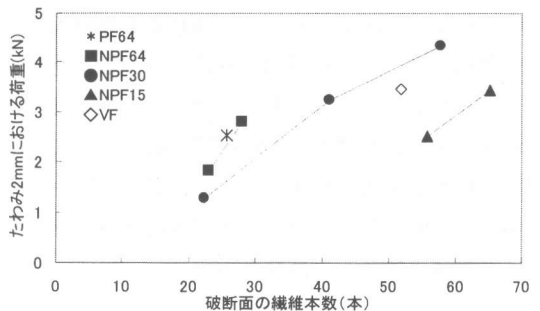


図-9 繊維本数と曲げ補強効果の関係(シリーズ II)

見られたような高い相関は認められなかった。そこで、図-10に供試体破断面に含まれる繊維の表面積の総和とたわみ2mmにおける荷重の関係を示す。なお、図にはシリーズ I の結果も併

記した。図に示すとおり、破断面の繊維表面積とたわみ 2mm における荷重の関係には、どちらのシリーズについても高い相関が認められた。この両者に高い相関関係がある理由として、曲げ強度試験において、供試体のたわみが 2mm の状況では、ひび割れ面の繊維は引抜け状態にあり、供試体の耐力は繊維の引抜けに対する抵抗に支配され、繊維のヤング係数の影響が非常に小さいと考えられた。また、たわみ 2mm 時点での両繊維の付着強度は非常に近い値であったと推察された。なお、シリーズ II の荷重がシリーズ I の荷重より相対的に小さい原因としては、コンクリート強度が高い場合、最大荷重が大きくなるため、ひび割れ発生時に繊維が負担する荷重が増加することになり、繊維の引き抜けが促されたことによるものと考えられた。

表 9 に鉄筋膨張圧模擬試験の結果を示す。今回はひび割れ幅についても測定を行ったため、表には各時間の最大ひび割れ幅を記載した。基本配合の剥落時間がシリーズ I の結果と異なるが、これはコンクリート強度が異なることによるものと考えられた。そこでシリーズ II では、計測時間をシリーズ I より延ばし 120 時間まで継続した。本シリーズでは、NPF の混入率を 0.2vol% としたケースについても試験終了まで剥落を生じることにはなかった。この理由として、前述の引張強度試験結果と同様に、繊維径を 3000d および 1500d と細くし、繊維本数を増加させたことにより、繊維の表面積が増加したためと考えられた。また、基本配合のひび割れ幅が落下直前の計測結果で 1mm 程度であったのに対し、繊維を混入したケースでは、最大ひび割れ幅が 30mm 程度であってもかぶり部のコンクリートが落下することにはなかった。

4. まとめ

本研究の結果、今回使用した範囲の繊維において以下のことが明らかとなった。

- (1) 剥落防止効果は、繊維の表面積と高い相関があり、繊維径を細くすることで、少ない混入

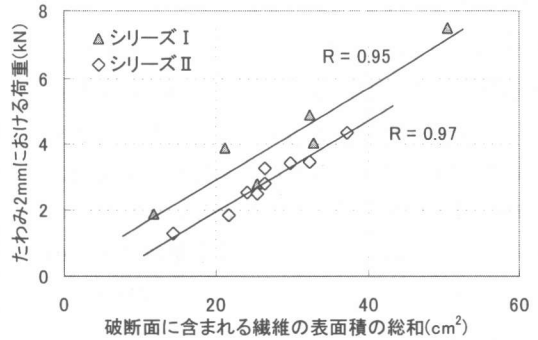


図-10 繊維表面積と曲げ補強効果の関係

表-9 鉄筋膨張圧模擬試験結果(シリーズ II)

繊維種類	(基本)	NPF15	NPF30	
混入率(%)	—	0.2	0.35	
24時間経過	剥落	2.5	2.0	2.0
48時間経過	—	17.0	18.0	11.0
120時間経過	—	28.0	32.0	26.0

数字;最大ひび割れ幅(mm)

率で剥落防止性能を付与できる。

- (2) ひび割れ発生以降の耐力は、繊維の引抜けに対する抵抗性の影響が大きく、繊維のヤング係数および強度の影響は小さい。
- (3) ポリプロピレン繊維 (3000d および 1500d) およびビニロン繊維 (4000d) をコンクリートに対し、0.2vol%混入することで、コンクリートに剥落防止性能を付与できることを確認した。

参考文献

- 1) たとえば 斉藤誠：はく落対策に向けたトンネル補修・補強技術，土木施工 vol.41, NO.11, pp26~29, 2000
- 2) 篠原貴，徳光卓，福井英輔，山本政彦：各種コンクリート剥落防止工法の剥落防止性能に関する基礎的実験，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-593, 2000.9
- 3) 平石剛紀，坂田昇，矢吹増男，細田常正：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，コンクリート工学年次論文集，vol.22, NO.1, pp283~288, 2000.7,