

ポリエチレン繊維補強モルタルの基礎的性状と引張部位への適用に関する研究

水越 睦視*

Experimental Study on Application of Polyethylene Fiber Reinforced Mortar as Tension Material

Mutsumi MIZUKOSHI

概要

ポリエチレン繊維補強モルタルの配合試験をビニロン繊維を用いた場合との比較で行った結果、水セメント比が 30 % の高強度領域においてビニロン繊維よりも優れたじん性能を示すことがわかった。次に、ポリエチレン繊維補強モルタルをRC部材の引張部に埋設型枠あるいは断面修復材として用いた場合の適用性をRCはりの曲げ載荷試験により評価した。その結果、ポリエチレン繊維補強モルタルを埋設型枠、断面補修材としてRCはり引張部に用いた場合、同一断面の一体打ちRCはりと同様以上の耐荷性能を示し、ひび割れの分散性も良好で優れたひび割れ幅抑制効果が得られることが明らかになった。

キーワード：高じん性、ポリエチレン繊維、引張性能、ひずみ硬化、断面修復

1. はじめに

近年、既存の短繊維補強セメント複合材料の変形性能を大きく向上させた高じん性セメント複合材料 (DFRCC) が開発されている^{1,2)}。このDFRCCはひび割れ発生以降のひずみ硬化特性と、数多くの微細ひび割れが一様に分布するひび割れ性状 (マルチプルクラッキング) を示す特徴を有している。このため、変形に対する追従性が良好で大変形領域でも最大ひび割れ幅を小さくすることができ、部材表面にDFRCCを用いた場合、有害因子の浸入を抑制し、鉄筋コンクリート部材の耐久性の確保さらには向上への寄与が期待できる。併せて高強度化を図ることができれば、

従来のセメント系材料に代わる高性能な材料として補修補強や耐震分野等への適用が期待でき、構造性能についても革新的な向上を実現させる可能性を有している。

本研究ではDFRCCの高じん性に高強度性を付与したポリエチレン繊維補強モルタル (PEFRM) のRC部材への適用性を検討した。まず、ポリエチレン繊維 (PE繊維) の高強度・高弾性といった特性がモルタルに混入した場合に十分に発揮されるかを確認するための配合試験をビニロン繊維 (PVA繊維) を使用した場合との比較で実施した。

次にポリエチレン繊維補強モルタル (PEFRM) の用途として、埋設型枠としてのハーフプレキャスト構造への適用と劣化損傷した鉄筋コンクリート (RC) 部材の断面修復材としての利用を考え

* 香川高等専門学校高松キャンパス建設環境工学科

表 1 モルタルに使用した繊維の物性

Fiber	Tensile strength (N/mm ²)	Elastic modulus under tension (kN/mm ²)	Elongation percentage (%)	Diameter of monofilament fiber (μ m)	Length of fiber (mm)	Hydrophilic
PE	2600	88	3~5	12	12	×
PVA	1600	42	6	40	12	○

表 2 モルタルの示方配合

Type of mortar	W/C (%)	Vf (%) (vol. %)	S/C	Unit content (kg/m ³)				
				W	C	S	Fiber	SP
PEFRM	30	1.5	0.32	384	1280	415	14.6	12.8
	30	2	0.32	382	1273	413	19.4	19.1
	35	1.5	0.32	420	1200	388	14.6	6.0
	45	1.5	0.32	480	1067	344	14.6	-
PVAFRM	30	1.5	0.32	384	1280	415	19.5	12.8
	30	2	0.32	382	1273	413	26	19.1
	35	1.5	0.32	420	1200	388	19.5	6.0
	45	1.5	0.32	480	1067	344	19.5	-

た。そこで、第2段階としてPEFRM製の埋設型枠を引張部に使用したRCはり供試体と引張部のかぶりコンクリートを全面にわたり剥落させたRCはりをPEFRMにて補修したRCはり供試体を曲げ載荷試験に供し、両用途への適用性について実験的に評価した。

2. ポリエチレン繊維補強モルタルの配合試験

2.1 実験概要

(1) 使用材料

配合試験に用いた材料は、早強ポルトランドセメント(密度3.13g/cm³)、細骨材(海砂、表乾密度2.56g/cm³、吸水率2.00%、F.M.1.90)、ポリエチレン(PE)繊維、ビニロン(PVA)繊維、高性能減水剤(ポリカルボン酸系)である。実験に用いた繊維の物性を表1示す。使用したPE繊維の集束方法、最適な繊維長などについては既に検討しており、繊維長15mmで引張性能は最大値を示したが、最終的には繊維の飛散状況、練混ぜ性能および施工性を考慮し12mmとした³⁾。細骨材は、汎用的に入手可能なコンクリート用細骨材を用いた。

(2) 実験要因および配合

実験に使用した繊維補強モルタルの配合を表2に示す。PEFRMの配合条件として、15打テーブルフローを140±10mm、空気量の範囲を3.0±1%とした。実験要因は、水セメント比(W/C)と繊維混入率(Vf)とし、主に引張性能に及ぼす影響

をビニロン繊維補強モルタル(PVAFRM)との比較で検討した。

(3) 実験方法および測定項目

モルタルの練混ぜは、セメント、細骨材、繊維をポリ袋でプレミックスした後ホバートミキサーに移し15秒間空練りし、その後、水および高性能減水剤を投入し2分間の本練りを行った。モルタルの練上り温度は、20±1℃に調整し、練上り後、直ちにフレッシュ試験を実施した。供試体は作製後、20℃の恒温槽内で静置し、翌日に脱型を行い、試験材齢の7日まで20℃恒温水槽にて水中養生した。

フレッシュ性状試験として、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に準拠したテーブルフロー試験、およびJIS A 1171(ポリマーセメントモルタルの試験方法)に準拠したスランプ、空気量の各試験を行った。

硬化したモルタルについては、引張性能をJSCE試験方法2¹⁾に準拠し、ダンベル形状(試験区間:80mm、厚さ:13mm、幅:30mm)の供試体を用いた直接引張試験により評価した。載荷速度はクロスヘッドの変位量が0.5mm/分となる変位制御により実施し、同時に引張ひずみも測定した。なお、評価は5体の供試体の平均値で行った。直接引張試験の状況を図1に示す。圧縮強さ試験は、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準じてφ50×100mmの円柱供試体を用いて行った。

表3 モルタルのフレッシュ性状および圧縮強度

Type of mortar	Temperature (°C)	W/C (%)	Vf (vol. %)	flow (mm)	slump (cm)	Air content (%)	Compressive strength (N/mm ²)
PEFRM	20	30	1.5	145	6.3	3.0	86.7
		30	2	131	5.4	2.0	82.0
		35	1.5	142	5.8	2.0	67.6
		45	1.5	146	4.0	3.5	38.1
PVAFRM		30	1.5	180	9.4	3.0	86.6
		30	2	147	7.3	2.0	73.6
		35	1.5	187	8.9	2.6	60.0
		45	1.5	187	4.2	1.5	43.4

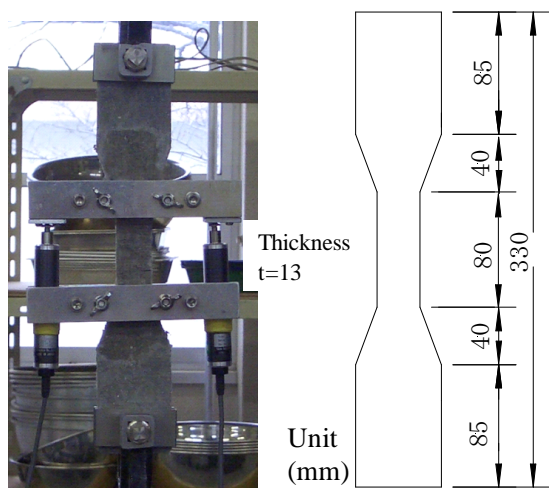


図1 引張試験状況および供試体の形状寸法

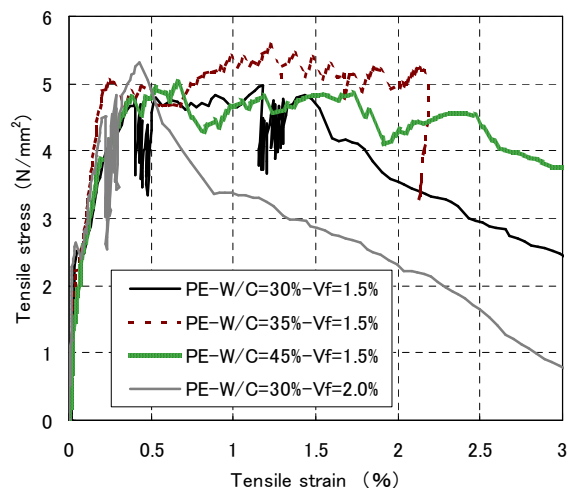


図2 引張応力とひずみの関係

2.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状および圧縮強度

各種繊維補強モルタルおよび普通モルタルのフレッシュ時における試験結果と材齢7日における圧縮強度の一覧を表3に示す。PEFRMのフレッシュ性状は、配合条件を満たしており、大きな繊維ダマも認められなかった。同一の繊維混入率では、PE繊維よりもPVA繊維を使用したモルタルの方がフローとスランプは大きかった。これは、繊維径がPE繊維の方が細いため、単繊維間にモルタルが吸収されるためであると考えられる。圧縮強度はW/Cに応じて良好に発現していることがわかる。ただし、繊維混入率が1.5%から2.0%に増加すると圧縮強度は低下する傾向にあった。

(2) 引張性能

PEFRMの代表的な応力-ひずみ曲線を図2に示す。図より、PE繊維混入率Vf=2.0%の配合における最大応力以降の応力低下は大きいものの、Vf=1.5%の配合ではW/Cに関係なく著しい応力低下を示していないことがわかる。また、ひずみ



写真1 マルチプルクラックの発生状況

硬化挙動を示すとともに、実験時の観察においても写真1のような顕著なマルチプルクラッキング現象が認められた。

引張性能とW/Cの関係 (Vf=1.5%) を図3に示す。W/C=45%では、モルタル自体の強度が低く繊維との付着力も弱いため、PEFRMではPE繊維の引き抜けが生じ、引張性能はさほど高くなかった。一方、PVA繊維は、親水性を有しているため、PE繊維よりもモルタルとの付着がよいため、PVAFRMの方がPEFRMより高い引張性能を示したもの

と考えられる。しかし、高強度領域のW/C=30%では、モルタルの強度が高く繊維との付着力が強くなるため、繊維の引張強度の大きいPEFRMの方が引張強度は大きくなった。PVAFRMは、W/Cが小さくなり付着が強くなっても繊維自身の引張強度が弱いため、引張強度に変化はみられなかったものと思われる。また、引張終局ひずみ(軟化開始点のひずみ)⁴⁾は両者ともに1.0%を超えており、高いじん性を有しているといえる。W/C=35%における引張終局ひずみはPEFRM、PVAFRMともにW/C=45%と同程度であった。

引張性能とVfの関係(W/C=30%)を図4に示す。図より、W/C=30%の場合、引張終局ひずみは繊維混入率を1.5%から2.0%に増加させると、PEFRM、PVAFRMともに小さくなるのがわかる。引張強度は、繊維混入率を2.0%に増加させると、PVAFRMでは大きくなったが、PEFRMではVf=1.5%に比べ低下した。これらは、繊維混入率を2.0%まで増加させたことにより、モルタル中の繊維の分散性が低下したためであり、特にモノフィラメント繊維径の小さいPE繊維の分散性はPVA繊維よりも低いことが原因であると考えられる。

以上より、PE繊維を使用し、W/C=30%、繊維混入率Vfを1.5%とすると、引張終局ひずみ1%以上の高引張じん性と5.0N/mm²程度の高い引張強度を発揮できる優れた引張性能を有する繊維補強モルタルが得られることが明らかとなった。

3. RCはりの載荷実験

3.1 実験概要

(1) 供試体および載荷方法

実験に使用したRCはり供試体の概要を表4に、供試体の形状寸法を図5に示す。主鉄筋にD13(SD295A)、スターラップにはD10(SD295A)を使用した。また、供試体の種類は、NN、ECC-P、ECC-Rの3種類で形状寸法と配筋状態は同じとした。ECC-Pはりの作製は、予め深さ5mm程度の格子状の凹凸を施した厚さ40mmのPEFRM製プレキャスト埋設型枠上面にプライマー処理を行い、コンクリートを打設することにより行った。ECC-Rはりは、かぶり部分を予め全面にわたり欠損させておき、その表面をワイヤブラシで研磨した後、プライマー処理を施しポリマー入りPEFRMを打ち継ぎコテ仕上げすることにより作製した。また、NNはりは比較用の一体打ちRCはり供試体である。供

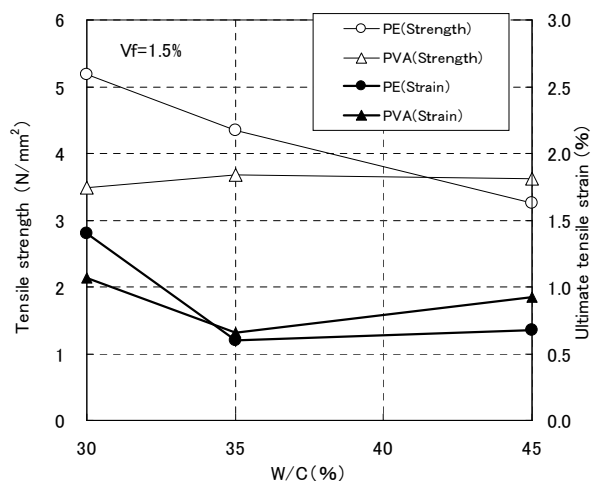


図3 引張性能と水セメント比の関係

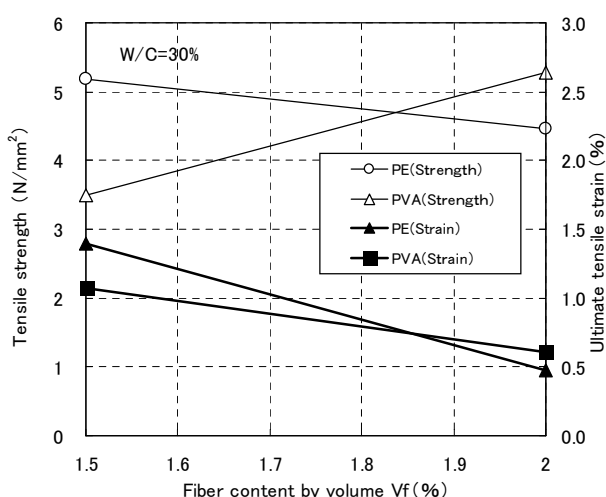


図4 引張性能と繊維混入率の関係

表4 RCはり供試体の概要

No.	Specimen	Cross section (mm)	Main reinforcement	Use of special layer
1	NN	b × d = 150 × 200	2-D13	-
2	ECC-P			Precast PEFRM
3	ECC-R			Repair PEFRM

試体の本数は、NN、ECC-P、ECC-Rの各種類で2本作製し実験に供した。

載荷方法は、図5に示すせん断スパン有効高さ比(a/d)3.0の曲げ卓越型の4点曲げ載荷とした。測定項目は、スパン中央たわみ、コンクリートおよび鉄筋ひずみ、ひび割れ幅、ひび割れ進展状況である。

(2) 材料特性

使用した鉄筋の物性を表5に、コンクリートお

よびモルタルの物性を表6に示す。なお、ECC-Rはりに用いた断面修復用のPEFRMには、既存コンクリートとの付着を向上させる目的でセメント混和用ポリマー（PAE系）をセメント質量に対して10%混和した。埋設型枠、断面補修材として使用したPEFRMの直接引張試験より得られた代表的な応力-ひずみ曲線を図6に示す。図より、使用した繊維補強モルタルは引張応力下において、ひび割れ発生後も応力の低下がなく、ひずみの増加に伴って応力が増加するひずみ硬化特性を示していることがわかる。また、複数の微細なひび割れが発生するマルチプルクラッキング現象も確認され、最大応力時の引張ひずみは約1%となることがわかった。ECC-Pはりに用いたPEFRMとECC-Rはりに使用したPEFRMは、ともにW/C=30%、繊維混入率V_f=1.5%であるが、ECC-R用の配合では、ポリマー混和効果により、引張強度がポリマー無混和のECC-P用の配合よりも大きくなっていることがわかる。

3.2 試験結果および考察

RCはりの載荷試験結果の一覧を表7に示す。表より、同じ種類の供試体間の試験値のバラツキは小さいことがわかる。

(1) 荷重とスパン中央たわみの関係

荷重とスパン中央たわみの関係を図7に示す。ECC-Pはり、ECC-Rはりともに、下面のかぶり部分に使用した埋設型枠、断面補修材が引張応力に抵抗するため、降伏荷重はNNはりに比べ約1.4倍、1.6倍に増加した。しかし、降伏直後に埋設型枠、断面補修材内の1本の曲げひび割れ幅が急

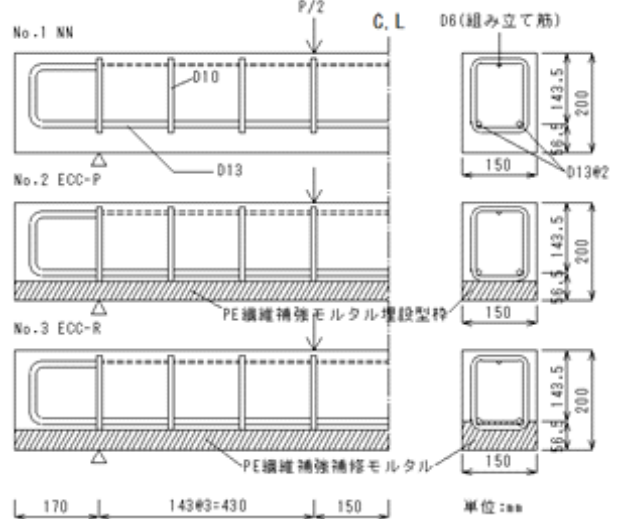


図5 供試体の形状寸法と載荷位置

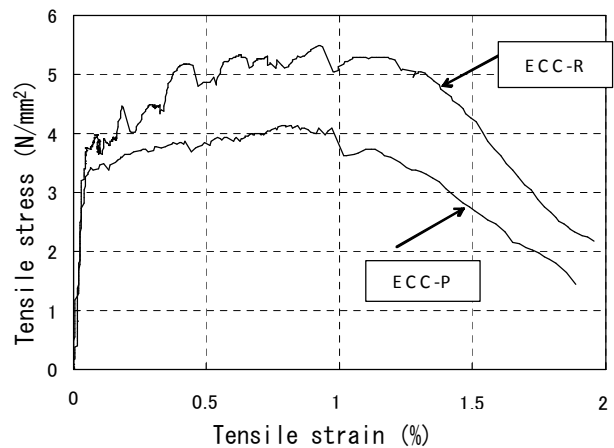


図6 モルタルの引張応力とひずみの関係

増し急激な耐力低下を生じた。これは、埋設型枠、断面補修材が引張抵抗材としての機能を瞬

表5 RCはりに使用した鉄筋の物性

Reinforcement	Use	Sectional area (mm ²)	Yield stress (N/mm ²)	Yield strain (μ)	Elastic modulus (kN/mm ²)
D13@2	Main reinforcement	253	351	1755	200
D10@2	Shear reinforcement	142.7	345	1725	200

表6 RCはり載荷時のコンクリートとモルタルの強度特性

Types of beam	Types of material	W/C (%)	Compressive strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elastic modulus (kN/mm ²)
NN	concrete	55	42.7	3.8	29.1
ECC-P	PEFRM	30	85.0	4.1	27.1
ECC-R	PEFRM with polymer		63.6	5.1	18.1

表 7 RCはりの載荷試験結果

Specomen	Flexural crack load (kN)	Shear crack load (kN)	Yield load (kN)	Ultimate load (kN)
NN-1	13.5	48.0	58.0	69.0
NN-2	14.0	34.0	58.0	71.0
ECC-P-1	16.5	46.0	78.5	80.0
ECC-P-2	17.5	44.0	80.0	82.5
ECC-R-1	28.0	44.0	88.5	89.5
ECC-R-2	17.5	60.0	90.0	90.0

時に失ったためである。その後、ECC-Pはりは、NNはりと同様の挙動を示したが、ECC-Rはりでは耐力低下が小さかった。これは、ECC-Rはりの方がECC-PはりよりもPEFRM部分の断面が厚く、さらにFig. 6に示したように引張性能がECC-Rはりに用いたPEFRMの方が優れていたためであると考えられる。

(2) 破壊性状およびひびわれ特性

載荷試験後のはり供試体の破壊状況を図8に示す。NN、ECC-P、ECC-Rはりともに鉄筋が降伏した後に圧縮側のコンクリートが圧壊し破壊に至った。今回、ECC-PはりおよびECC-Rはりの打継ぎ処理は、比較的簡易な方法によるものであったが、終局時にコンクリートと埋設型枠の界面にひび割れが発生したものの降伏までの使用状態では界面でのずれは認められず、埋設型枠および断面補修材とともに引張抵抗材としての機能を十分に果たしていたものと考えられる。

ひび割れの進展状況は、NNはりとは異なり、後者では複数の微細曲げひび割れが埋設型枠、断面補修材に発生し繊維補強モルタル部を貫通した後、連続的にコンクリート部に進展した。荷重の増加に伴うひび割れ幅の推移を図9に示す。図より、ECC-Pはり、ECC-Rはりともに、NNはりで既に0.15~0.2mm程度のひび割れ幅に達している荷重においても、ひび割れの発生は認められなかった。さらにNNはりの降伏に相当する荷重近傍でもわずか0.05mm幅のひび割れが確認される程度であり、優れたひび割れ抵抗性を示した。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ポリエチレン繊維補強モルタルは、ビニロン繊維補強モルタルに比べ、高強度領域において優れた引張性能を発揮する。しかし、低強度領域ではビニロン繊維補強モルタルの方が引張性能は優れている。

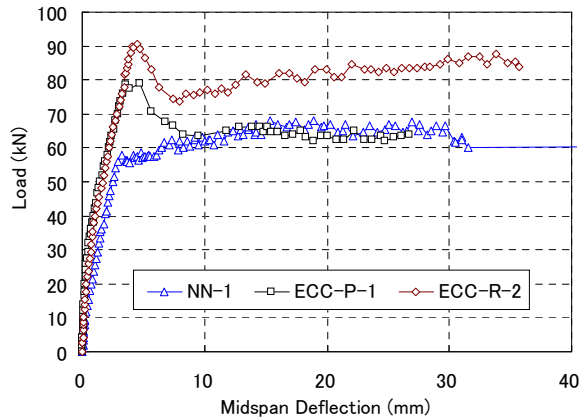


図 7 荷重とスパン中央たわみの関係

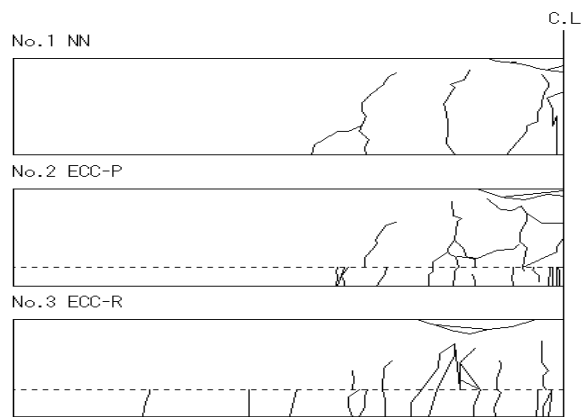


図 8 RCはり破壊時のひび割れ状況

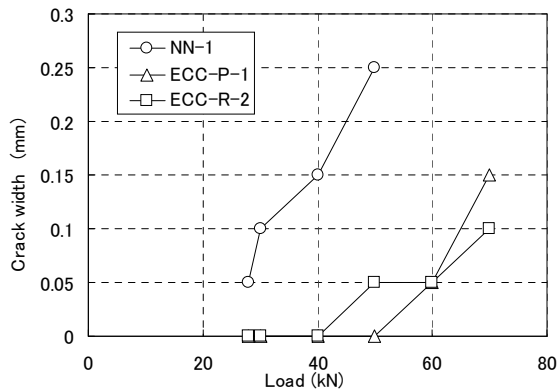


図 9 荷重の増加に伴うひび割れ幅の推移

水越睦視：ポリエチレン繊維補強モルタルの基本特性と引張部位への適用に関する研究

- (2) 水セメント比が30%のポリエチレン繊維補強モルタルは、繊維混入率2.0%でも大きなじん性能を示す。ただし、1.5%の場合よりじん性能は低下する傾向が窺え、モルタル中の繊維の増加による施工性の低下を考えると繊維混入率は1.5%の方が適当である。
- (3) ポリエチレン繊維補強モルタルを埋設型枠、断面補修材としてRCはり下面引張部に用いた場合、一体打ちのはりと同等以上の耐荷性能を示し、ひび割れの分散性も良好で、優れたひび割れ幅抑制効果が得られることが明らかになった。

参考文献：

- 1) Li, V.C, and Kanda, T.: Engineered Cementitious Composites for Structural Application, J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No.2, pp.66-69, 1998
- 2) 閑田徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状、コンクリート工学、Vol. 38、No. 6、pp. 9-165、2000
- 3) 水越睦視ほか：高強度高じん性繊維補強セメント複合体の開発実験、セメント・論文集、No. 57、pp. 444-449、2003
- 4) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準、pp. 11-14、1984