

# 報告 短繊維と繊維シートを併用した高靱性モルタルに関する基礎的研究

西脇 敬一<sup>\*1</sup>・川又 篤<sup>\*2</sup>・柳 博文<sup>\*3</sup>・松岡 茂<sup>\*4</sup>

要旨：短繊維を混入したモルタルは、ひび割れ発生後も繊維によって伝達応力が保持・増加されるため、ひび割れが分散し靱性能が高まることが知られている。一方、連続繊維シートを配置したモルタルでは、連続繊維シートがひび割れ面間を架橋するため、大きな変形に追従でき、また繊維の優れた引張強度により耐力を増加させることが可能と考えられる。これは補強鉄筋に似た挙動である。本研究では、各々の利点を発揮させるために両者を併用することを考え、短繊維のみあるいは連続繊維シートのみで補強したモルタルとの比較を行った。さらに、断面計算を行い、耐力線図に試験結果をプロットして算定方法の妥当性を確認した。  
キーワード：短繊維、連続繊維シート、繊維補強セメント系材料

## 1. はじめに

鋼繊維などの短繊維をコンクリートに混入すると繊維の架橋作用により、コンクリートの引張破壊特性が改善されることが知られており、その結果として、大きな曲げ変形性能を示す。しかしながら、短繊維の架橋作用はコンクリートにひび割れが発生した後に発揮されるため、短繊維を混入してもコンクリートの引張強度を大幅に向上することができない。

一方、連続繊維については、引張強度に優れた炭素繊維などを引張補強材として用いたコンクリート部材に関して研究開発が行われている<sup>1)</sup>。炭素繊維などに代表される新素材をコンクリートの引張補強材として用いると曲げ耐力は増加するが、鋼材と異なり新素材は破断強度まで、応力とひずみの関係がほぼ線形であるために曲げ変形能力が小さい。

そこで、曲げ変形性能の優れた短繊維補強コンクリートに引張補強材として新素材の連続繊維シートを付加することで、曲げ変形性能のみでなく曲げ耐力に優れた部材を開発する目的で試験を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料およびモルタルの配合

試験では、短繊維によって補強したモルタル、連続繊維シート(以下：繊維シートと称す)によって補強したモルタル、短繊維と繊維シートで補強したモルタルおよびプレーンモルタルの4種類のモルタルを用いた。なお、この短繊維補強モルタルは、筆者らの一人が高い疲労特性が要求される軌道と床版を連結する直結軌道コンクリート用として開発したものである<sup>2)3)</sup>。このモルタルは、高い疲労強度を有するだけでなく、ひび割れ分散性能も優れていることが確認されている。なお、繊維には、直径100 $\mu$ m、長さ12mmのポリビニールアルコール繊維(以下：PVA繊維と称す)を用いており、短繊維の混入率は2vol%である。

引張補強材として用いた繊維シートは、短繊維と同様にPVA繊維であり写真-1に示すようにメッシュ状となっている。繊維シートと短繊維の強度特性は、表-1に示すとおりである。

モルタルの配合を表-2に示す。以下、各々のモルタルを表中の記号にて略す。

\*1 鉄建建設(株) 技術センター 材料・構造グループ (正会員)

\*2 鉄建建設(株) 九州支店 博士(工学) (正会員)

\*3 鉄建建設(株) 技術センター 地盤グループ 博士(工学) (正会員)

\*4 鉄建建設(株) 技術センター 材料・構造グループ 博士(工学) (正会員)

## 2.2 試験方法

試験は、最初に短繊維の補強効果および繊維シートの補強効果を確認する目的で表 - 3 に示すように曲げ試験および引張試験などを実施した。補強材に繊維シートを用いる CF と CVF の圧縮および引張試験は、繊維シートによる補強を行わずモルタルのみで行った。

曲げ試験は、「JSCE-G 552 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」に準拠して実施したが、純曲げ区間に発生するひび割れ幅を推定する目的でパイ型変位計を純曲げ区間の底面に取り付けている。

直接引張試験については、筆者らが過去に提案した方法<sup>4)</sup>に基づいて実施した。この方法は、図 - 1 に示すように 10cm 角の供試体の両端部に鋼製の治具を取り付けて実施するものである。試験では、供試体中央に図 - 1 に示すように深さ 1cm の切り欠きを設け、この部分にクリップ型変位計を取り付けて変位を測定し、この値をひび割れ幅としている。

また、実際の部材では、曲げと軸力が同時に生じることが一般的であることから、軸力を導入した曲げ試験を図 - 2 に示す方法で実施した。軸力は、供試体両側に配置した PC 鋼棒に緊張力を加えることにより、供試体両端の載荷版を解

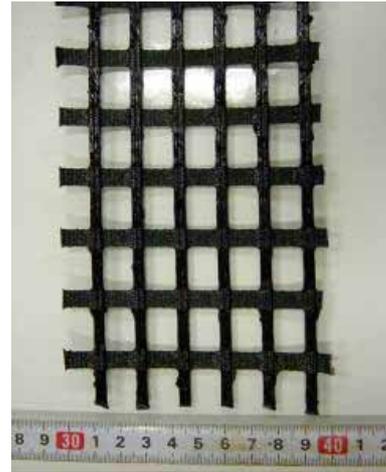


写真 - 1 繊維シート

表 - 1 短繊維と繊維シートの強度特性

短繊維	弾性係数	25.0kN/mm <sup>2</sup>
	引張強度	1.10kN/mm <sup>2</sup>
繊維シート	シート厚さ	1.5mm
	引張強度	88.0N/mm

表 - 2 モルタルの配合

モルタルの種類	記号	水セメント比 W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			水 W	セメント C	細骨材 S	高性能 AE 減水剤 SP	短繊維 VF		
ブレンモルタル	PL	40.0	320	800	1005	4.00	26.0		
繊維シート補強モルタル	CF							2.40	-
短繊維補強モルタル	VF							4.00	26.0
短繊維+繊維シート補強モルタル	CVF							4.00	26.0

表 - 3 試験内容

モルタルの種類	試験内容			
	圧縮	割裂引張	直接引張	曲げ
PL				
CF	1	1		
VF				
CVF	2		2	

1: 繊維シートを除いたモルタルのみで実施  
2: 繊維シートを除いた短繊維補強モルタルのみで実施

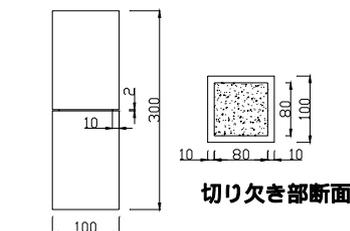


図 - 1 直接引張試験模式図

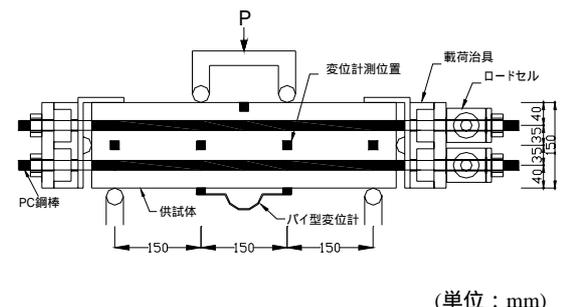


図 - 2 曲げ試験模式図

して導入した。曲げ試験中は、常にPC鋼棒の緊張力を一定に保持することで、供試体の軸力を一定としている。なお、導入軸力は、0kN、30kN、60kNおよび90kNの4種類とした。

### 3. 試験結果

VFおよびCFの曲げ試験における荷重-たわみ曲線を図-3と図-4にそれぞれ示す。なお、曲げ試験時のモルタルの圧縮強度は、表-4に示すようにPLとVFで大きな差異は見られない。VFでは、ひび割れ発生後に最大荷重に達し、その後は緩やかに荷重が低下する傾向を示しており、曲げ変形性能に優れていることが確認できる。これに対して、CFはひび割れが発生すると一時的に荷重が急激に低下し、その後は緩やかに荷重が増加する傾向を示す。ひび割れが発生すると荷重が一時的に低下する原因については検討中であるが、繊維シートとモルタルとの付

着切れや繊維シートの弾性係数が低いことなどによるものと想定される。

CVFの曲げ試験における荷重-たわみ曲線を図-5に示す。VFの場合と異なり、荷重の低下は見られず、RC部材と同様に曲げ耐力を保持した状態を示した。また、軸力を導入した場合についても、図-6に示すように軸力を導入しない場合と同様の傾向を示した。

### 4. 断面耐力算定方法

短繊維補強モルタルの曲げ性能については、短繊維の架橋作用を考慮した算定方法が提案さ

表-4 圧縮強度と引張強度の試験結果

モルタルの種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
PL	64.2	25.5	2.21
CF <sup>1</sup>	86.4	30.0	5.68
VF	54.4	24.4	3.36
CVF <sup>2</sup>	74.0	27.2	3.17

1:モルタルのみ(繊維シートを含まない)の試験結果  
2:短繊維補強モルタルのみ(繊維シートを含まない)の試験結果

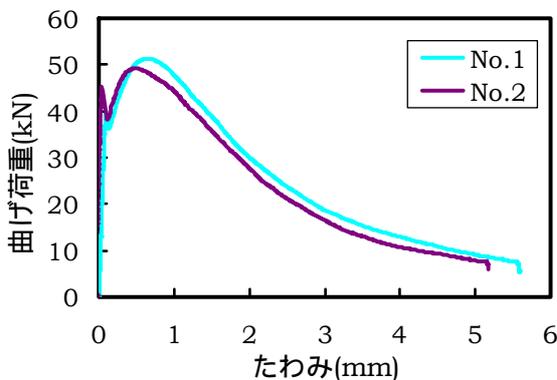


図-3 曲げ試験における荷重-たわみ曲線(VF)

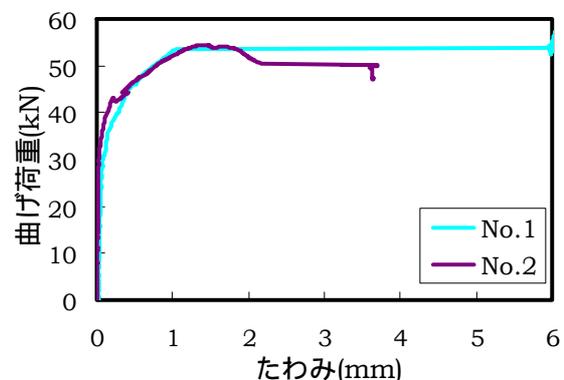


図-5 曲げ試験における荷重-たわみ曲線(CVF)

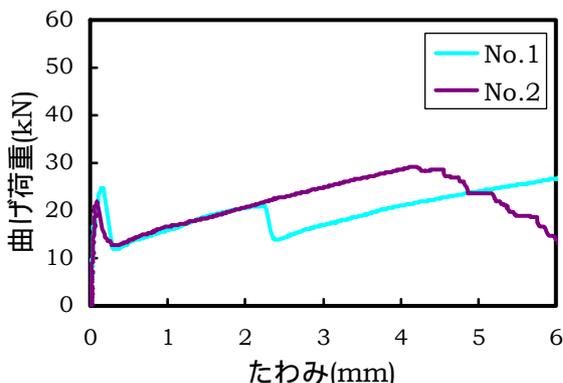


図-4 曲げ試験における荷重-たわみ曲線(CF)

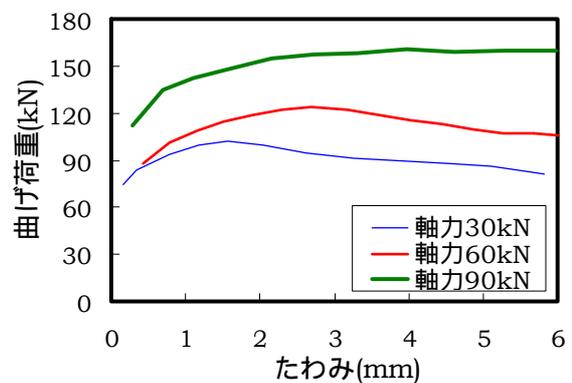


図-6 軸力を導した曲げ試験における荷重-たわみ曲線(CVF)

れている<sup>5)</sup>。さらに、架橋作用により向上する引張破壊特性は、ひび割れ幅と引張応力との関係である引張軟化曲線で表されることが知られている。引張軟化曲線は、直接引張試験で得られることから、直接引張試験結果に基づいて断面耐力算定に用いる引張軟化曲線を定めることとした。

直接引張試験結果によると、図-7に示すように引張応力は、ひび割れが発生すると一時的に低下するが、ひび割れ幅が増加すると再び大きくなり、再度ひび割れ発生応力付近に達した後緩やかに低下する傾向を示す。この試験結果に基づいて、断面算定に用いる引張軟化曲線は図-7に示すように二直線で近似した。このようにひび割れ面で伝達される架橋応力がひび割れ発生応力とほぼ等価になると、ひび割れ面近傍に新たなひび割れが発生することが考えられる。もし、純曲げ区間に複数のひび割れが発生した場合には、各々のひび割れ面に対して引張軟化曲線を考慮する必要があるが、本報告では、ひび割れが純曲げ区間に1本のみ発生するものと仮定した。

純曲げ区間にひび割れが1本発生した場合の短繊維補強コンクリートの曲げ耐力および曲げ変形性能の算定方法については筆者らが提案している方法<sup>4)</sup>を用いた。この方法は、曲げひび割れ断面におけるひずみおよび応力分布を図-8に示すように仮定し、下記の式で計算するものである。なお、圧縮側の応力-ひずみ曲線は、土木学会「コンクリート標準示方書 構造性能照査編」<sup>6)</sup>に従うものとする。圧縮側のひずみ分布は、図-8のひずみ分布の仮定から式(1)のように表される。

$$\varepsilon(y) = \frac{\varepsilon'_{cm}}{h - ah - C} \cdot y \quad (1)$$

さらに、ひび割れ面における引張応力は式(2)のようになる。

$$\sigma_t(y) = f_t + \frac{\omega \cdot \lambda}{\alpha \cdot h} (y + C) \quad (2)$$

ひび割れ断面における断面力は式(3)および(4)

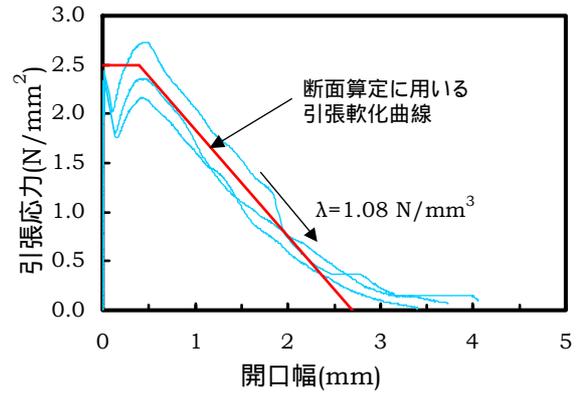


図-7 直接引張試験における  
応力とひび割れ開口幅の関係

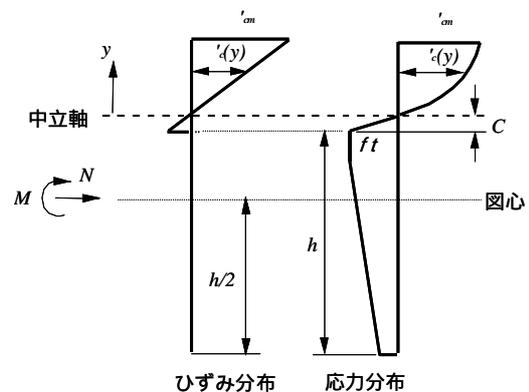


図-8 曲げひび割れ断面での  
ひずみ・応力分布の仮定

で計算される。

$$M = \int_0^{h-ah-C} \sigma'_c(y) \left[ y + ah + C - \frac{h}{2} \right] b dy - \frac{1}{2} \cdot f_t \cdot C \left[ ah - \frac{h}{2} + \frac{C}{3} \right] b - \int_{-(ah+C)}^{-C} \sigma_t(y) \left[ y + ah + C - \frac{h}{2} \right] b dy \quad (3)$$

$$N = \int_0^{h-ah-C} \sigma'_c(y) b dy - \frac{1}{2} \cdot f_t \cdot C \cdot b - \int_{-(ah+C)}^{-C} \sigma_t(y) b dy \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon'(y)$ : 中立的軸から距離  $y$  におけるひずみ、 $\varepsilon'_{cm}$ : ひび割れ直上の圧縮側縁ひずみ、 $y$ : 中立的軸からの距離、 $h$ : 断面高さ、 $C$ : 断面高さに対するひび割れ深さの割合、 $f_t$ : 引張強度、 $\lambda$ : 引張軟化曲線の傾き、 $C$ : ひび割れ先端から中立的軸までの距離、 $\varepsilon'(y)$ : 中立的軸から距離  $y$  におけるコンクリート応力、 $\sigma_t(y)$ : 中立的軸から距離  $y$  におけるひび割れ面の応力、 $\omega$ : ひび割れ最外縁におけるひび割れ開口幅、 $M$ : 曲げモーメント、

N：軸力である。なお、繊維シートについては、鉄筋と同様と考え、引張補強材の応力 - ひずみ曲線には繊維シートのものを用いた。

提案した方法で算定した断面耐力線を図 - 9 に示す。なお、図中には各々のモルタルの曲げ試験結果を併記した。

断面耐力線は、各々のモルタルについて以下のような結果が得られた。VF では、PL に比べ圧縮強度が若干小さくなったため、軸力は小さいものの、曲げモーメントは短繊維の架橋効果によって PL よりも大きくなった。CF は、最も圧縮強度が大きかったことより、軸力が大きくなったものの、繊維シートによる補強効果すなわち補強量が少ないために曲げモーメントは小さくなった。CVF は、CF と同様に繊維シートによる補強効果は小さくなったものの、VF と同様に短繊維による架橋効果が確認された。

断面耐力線の算定値は、いずれの場合におい

ても試験結果とほぼ一致していることが分かる。これより、今回の試験の範囲では、短繊維の架橋作用を引張軟化曲線で近似することによって、短繊維補強モルタルの場合と同様に、繊維シートを引張補強材とした短繊維補強モルタル部材の断面耐力を算定できることが確認された。

次に CF の変形性能を算定した結果を図 - 10 に示す。なお、繊維シートを用いた場合の変形性能算定式については、確立されていないため、鉄筋コンクリート部材の算定式を用いて試算した結果である。ただし、引張補強材の応力 - ひずみ曲線については繊維シートのものを使用した。計算結果によると繊維シートの補強量が少ないことと引張弾性率が低いことから、計算結果も試験と同様に曲げひび割れが発生すると荷重が一時的に低下する。その後は、繊維シートの効果により、荷重が増加する傾向を示している。しかしながら、ひび割れ発生後の変形挙動

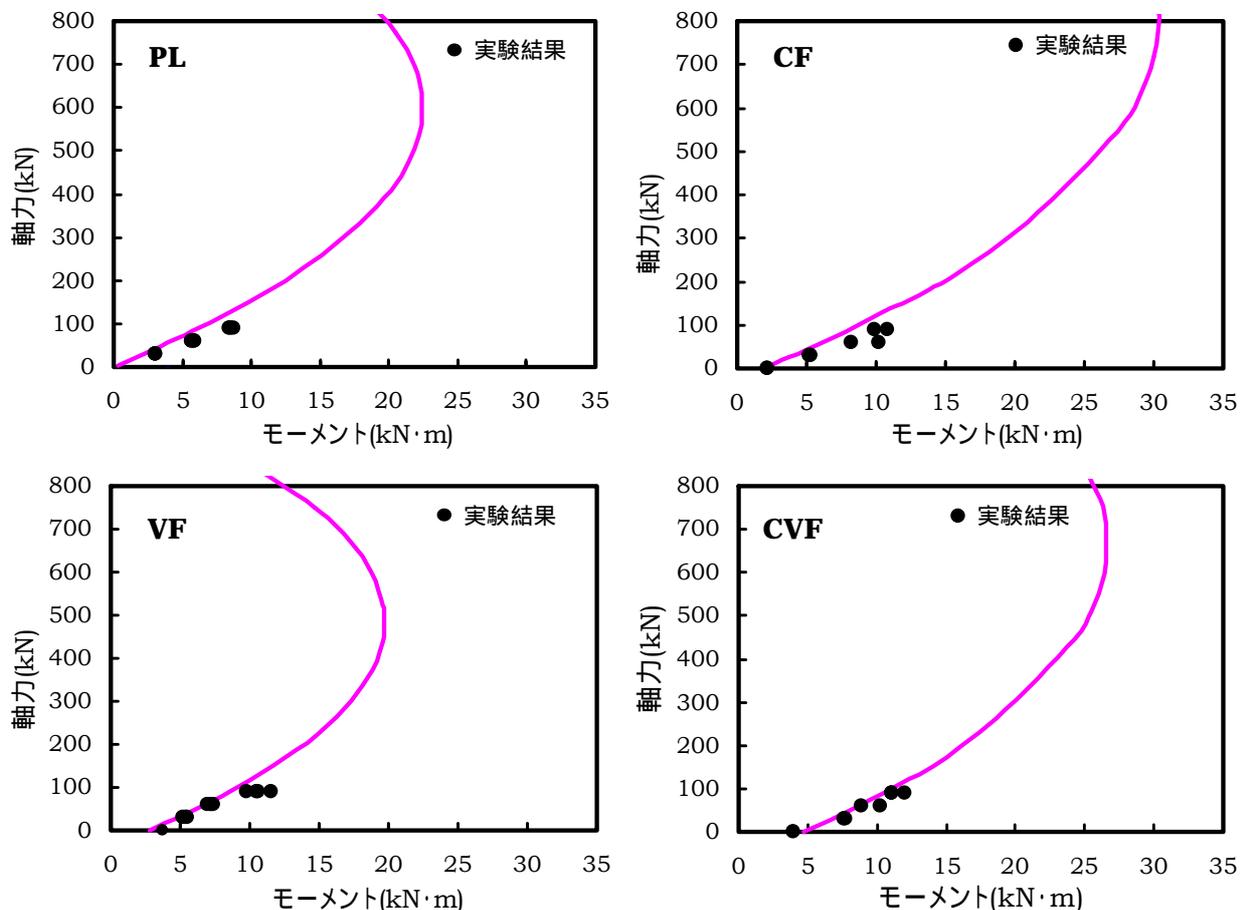


図 - 9 断面耐力線と試験結果

については、計算結果と試験結果とは異なっており、試験結果は計算より剛性が低い傾向を示している。繊維シートとモルタルとの付着性能については、現段階では確認していないことから、繊維シートとモルタルとの付着切れが生じた可能性がある。このような付着切れが生じると平面保持という仮定が成立しないために、試験値と計算値との間で差異が生じた可能性がある。今後は、試験によって繊維シートとモルタルとの付着性能等を確認し、繊維シートを用いた場合の変形特性を算定する手法を検討する必要がある。

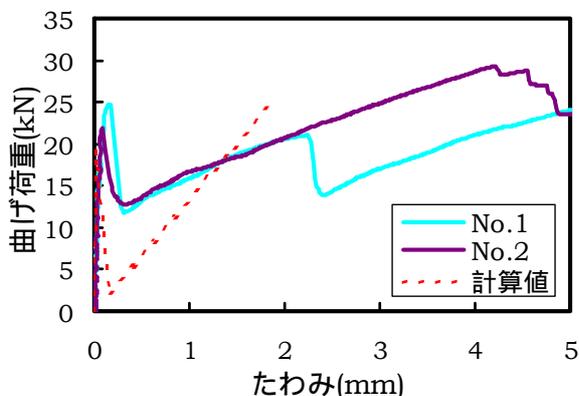


図 - 10 CF の荷重 - たわみ曲線の計算値

## 5. まとめ

変形性能に優れた短繊維補強モルタルに引張補強材として繊維シートを適用することで、最大荷重を保持した状態で変形が増加するような鉄筋コンクリート部材と同様の変形特性を示した。さらに、短繊維補強モルタルの断面耐力は、繊維の架橋作用で伝達される引張応力を考慮することで算定可能であることを確認した。

繊維シートを引張補強材とした断面耐力は、鉄筋コンクリート部材の算定式を適用することが可能である。しかしながら、変形性能につい

ては鉄筋コンクリート部材の算定式を適用することが難しく、繊維シートの特性を考慮した算定方法を検討する必要があると思われる。

今後は繊維シートの引張強度や引張弾性率が変形性能および断面耐力に与える影響を把握し、鉄筋コンクリート部材と同様に曲げ耐力と変形性能に優れた繊維シートを引張補強材とした短繊維補強モルタル部材あるいは短繊維補強コンクリート部材を開発していく予定である。

## 参考文献

- 1) 例えば、土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー72号，1992.4
- 2) 向井 明,安藤 勝敏,堀池 高広,中原 哲,渡辺 忠明,益田 彰久：繊維補強道床コンクリートを用いた弾直軌道の性能試験，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，第 部門， -454，pp.907-908，2002.9
- 3) 益田 彰久,松岡 茂,安藤 勝敏,堀池 高広,渡辺 忠朋,小川 敦久,末森 寿志：繊維補強道床コンクリートのひび割れ性状に関する実験的検討，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，第 部門， -029，pp.57-58，2003.9
- 4) 武田 康司,松岡 茂,松尾 庄二：SFRC の曲げ試験における引張軟化曲線の推定，コンクリート年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp1509-1514，1997
- 5) 例えば、土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計施工指針，コンクリートライブラリー97号，1999.11
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編 2002 制定，pp.26，2002.3