

報告 細径 PP 繊維を多混入した繊維補強コンクリートの作製方法に関する一検討

李 豪傑*1・西脇 智哉*2・佐藤 駿介*3・菊田 貴恒*4

要旨: コンクリートの力学特性改善や高機能化を目的に、細径 PP 繊維を体積比 1%まで混入するための調査および練混ぜ方法に関する検討を行った。ここでは、適切なワーカビリティを確保した練混ぜとするために、水セメント比・単位水量およびミキサー種類をパラメータとして取り上げ、フレッシュ性状と打設コンクリートの状態について確認した。その結果、体積比 1%の繊維混入とした場合でも、スランプ 12 cm 程度の十分なフレッシュ性状が得られる場合があること、および、繊維投入前に激しい材料分離が見られる場合であっても、繊維混入によって材料分離を抑えて良好なワーカビリティを得られる場合があることを確認した。

キーワード: 細径 PP 繊維, スランプ, スランプフロー, 材料分離, ミキサー

1. はじめに

コンクリートの性能改善と高機能化を目的として、短繊維をコンクリート中に分散させる繊維補強コンクリートについては、これまで既に膨大な検討が行われている。例えば、ポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維と表記）などの合成繊維については、コンクリートの収縮ひび割れの低減¹⁾や剥落防止機能の付与²⁾、火災時の爆裂防止性能の向上³⁾など、多岐に亘る用途で用いられている。ここで用いられる合成繊維の混入量は、体積比で 0.2%（以下、0.2 vol.%と表記）程度以下のものが多く、練混ぜ性状が著しく悪化しない範囲とするため、限られた範囲での混入量とならざるを得ない。

この一方、粗骨材を用いないモルタルをベースとした繊維補強セメント系複合材料（以下、FRCC と表記）の場合には、十分な量の合成繊維の混入により、曲げ応力下でのたわみ硬化を可能とした高靱性繊維補強セメント系複合材料（DFRCC）^{例えは 4)}や、引張応力下でひずみ硬化を可能とした複数微細ひび割れ型繊維補強セメント系複合材料（HPFRCC）^{例えは 5)}など、優れた力学特性が付与された材料が開発されている。これらの事例では、骨材には微小な細骨材のみを用い、補強繊維を 2 vol.%超混入している検討事例が多い^{4) 6)}。また、アスペクト比の大きい細径の合成繊維も積極的に用いられている。このような FRCC は、力学特性の改善のみならず、複数微細ひび割れを生じさせることでひび割れ幅の進展を抑制し、ひび割れの自己修復効果を促進させる効果なども確認されている⁷⁾。

これらを背景として、粗骨材を用いる通常のコンクリートに対しても、FRCC と同様の繊維量の混入が可能と

なれば、力学特性の改善や、何らかの理由でひび割れが生じた場合であっても自己修復効果の発揮が期待される。しかし、単純に投入量を増やしても著しいワーカビリティの低下が明らかでないため、使用可能なコンクリートとはならない。特に、FRCC で成果が見られるアスペクト比が数百を超える細径合成繊維を使用する場合には、著しいワーカビリティの低下が見られる。

これまでの検討例では、太径短繊維（直径 0.2 mm, 長さ 12 mm, アスペクト比 60）を用いた場合で、1 vol.%の混入量でスランプ 12 cm 程度を得られたと認める⁸⁾が、細径の合成繊維を 1 vol.%程度の混入量として用いた検討例は極めて稀である。

上記のことを背景に、ここでは FRCC において自己修復効果の付与が確認されている細径 PP 繊維⁹⁾を対象に、粗骨材を用いる通常のコンクリートに 1 vol.%程度の混入量とした場合であっても流動性が確保できるような調査、および、練混ぜ方法についての検討を行う。ここで、水セメント比（以下、W/C と表記）、単位水量および使用ミキサーをパラメータとして練混ぜを行い、フレッシュ性状と打設後のコンクリートの状態について確認した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

本研究で用いた使用材料を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には陸砂と砕砂の二種類を混合して粒度調整を行ったものを、粗骨材には砕石を使用した。混和剤としては高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を使用した。図-1 に使用した PP 繊維を示す。繊維長さは 6 mm, 織度 2.2 dtex, 換

*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期（学生会員）

*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 ダイワボウポリテック株式会社 播磨研究所 修士（工学）

*4 日本工業大学 工学部建築学科 准教授 博士（工学）（正会員）

表-2 試験調合

番号	シリーズ	単位使用量(kg/m ³)				W/C (wt.%)	s/a (vol.%)	SP/C (wt.%)	F (vol.%)	使用ミキサー	備考
		W	C	S	G						
①	185-0.4-Z	185	463	991	660	40	60	2	1	ジクロス	
②	185-0.4-O	185	463	991	660	40	60	2	1	オムニ	
③	185-0.3-Z	185	617	913	608	30	60	2	1	ジクロス	
④	185-0.3-O	185	617	913	608	30	60	2	1	オムニ	
⑤	250-0.4-O	250	625	805	536	40	60	2	1	オムニ	
⑥	273-0.4-O	273	683	738	493	40	60	2	1.1	オムニ	材料投入 順序変更
⑦	301-0.4-O	301	753	659	438	40	60	2	1.2	オムニ	
⑧	333-0.4-O	333	833	567	378	40	60	2	1.3	オムニ	

算直径 18 μm で、平均アスペクト比は 342 である。また、**図-1(b)**に示すように、四葉断面形状を有しており、さらに繊維表面を親水化のため、後処理工程においてコロナ放電および親水油剤処理を施した繊維をここでは用いた。

2.2 使用調合

ここでは、著者らがこれまでに取り組んできた FRCC の調合^{例えは 10)}に比較的近くなるよう、s/a を 60%程度と大きい既往の高流動コンクリートの調合¹¹⁾をベースにして調合を決定した。また、減水剤の使用量については、著しいワーカビリティの低下が予想されているため、硬化遅延などの影響を抑えられる範囲の最大限の使用量として、2%を一定とした。実験のパラメータには単位水量、W/C および使用ミキサーを取り上げ、繊維混入量については 1 vol.%を基本として実験を行った。単位水量は JASS 5¹²⁾での最大量となる 185 kg/m³を基本とし、これを超える量についても検討を行った。ここで用いた調合表を表-2 に示す。

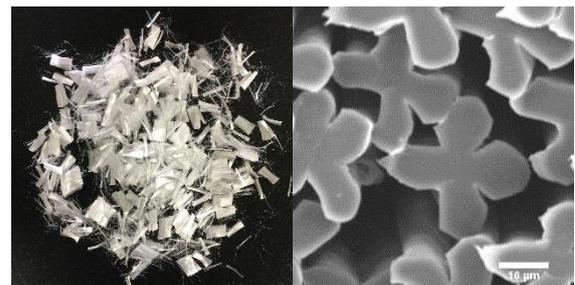
2.3 練混ぜ方法

表-1 に示すシリーズ①~⑤の練混ぜ方法は JIS A 1132¹³⁾の方法を参考に決定した。まずは細骨材およびセメントをミキサーに投入して1分間の空練りを行い、続けて予め減水剤を投入しておいた水をミキサーに投入して1分間練混ぜを行った。次に粗骨材を投入して1.5分間、最後にPP繊維を概ね30秒ごとの3回に分けて投入し、合計5分間で練混ぜを行った。シリーズ⑥~⑧では材料の投入順序を変え、セメントおよび減水剤を予め投入した水を練り混ぜ、ここに繊維、細骨材および粗骨材の順序で投入した。

ミキサーは螺旋アーム式二軸強制練りミキサー（北川鉄工所社製 WHQ-60A・容量 60 L。以下、ジクロスミキサー）および揺動式ミキサー（チヨダマシンリー社製 OM-30SA・容量 30 L。以下、オムニミキサー）の二種類を用いた。ジクロスミキサーは、練混ぜ分散に障害とな

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm ³ , 比表面積 3230 cm ² /g
細骨材	S ₁	福島県産陸砂, 表乾密度 2.61 g/cm ³ , 実積率 64.2%
	S ₂	福島県産砕砂, 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 実積率 65.1%
粗骨材	G	福島県産砕石, 表乾密度 2.69 g/cm ³ , 実積率 61.0%
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤, 密度 1.05 g/cm ³
合成繊維	F	PP 繊維, アスペクト比 342, 2.2dtex×6mm, 密度 0.92 g/cm ³



(a) 外観性状 (b) 内部断面形状

図-1 PP 繊維

るシャフト部分をなくし、螺旋アームを回転させることで、高速で効率の良い練混ぜを可能にしたミキサーである¹⁴⁾。オムニミキサーについては、従来のコンクリート用ミキサーとは異なる機構であり、材料の速度や方向等を変化させ不規則な揺動を与えながら練混ぜを行うもので、高流動コンクリート¹⁵⁾、や繊維補強コンクリート等の練混ぜに適しているとされている。練混ぜ量は1バッチあたり 12L とした。オムニミキサーの場合ではミキサーの容量の 40%と設定した。ジクロスミキサーの場合で

は、60Lの容量と比較すると、約20%とやや少ない練混ぜ量であったが、通常のコンクリートでは十分な練混ぜが可能であることから、こちらも12Lとした。今後は、練混ぜ量についても検討を行う。

2.4 測定項目

練り混ぜたフレッシュコンクリートに対し、練り上がり温度、スランプおよびスランプフローの測定を行った。これらの測定は、繊維の投入前および投入後にそれぞれ行った。ただし、表-2の備考に示すように、⑥~⑧のシリーズについては材料の投入順を変更しているため、繊維混入前の計測結果が得られていない。これらを計測した後、10×10×40 cmの鋼製型枠および直径10 cm×高さ20 cmの使い捨て円柱型枠に投入して得た試験体により、表面性状から打設の状態を確認した。

3. 試験考察

3.1 フレッシュ性状の考察

フレッシュコンクリートの測定結果を表-3に示す。①~④はW/Cおよびミキサーをパラメータとした検討である。図-2および図-3に示すように、いずれの調査であっても繊維混入前のフレッシュ状態は十分な流動性を示しており、スランプフロー値を測定した。ただし、図-3(a)に示すような材料分離が生じた場合、測定の際には分離したセメントペーストの先端により測定した。表-3に示すように、W/Cに関わらずジクロスミキサーの場合にはスランプフロー値が57 cm程度、オムニミキサーの場合は64 cm程度となった。この一方で、繊維混入後の材料にはワーカビリティが著しく低下し、図-3(b), (d)に示すように、まったくスランプを生じなかった。使用ミキサーについて比較すると、ジクロスミキサーを用いた場合よりも、オムニミキサーを使用した場合の方が、いずれのW/Cであってもスランプフロー値が大きい。これは、オムニミキサーの場合、材料を加速ランダム方向に揺動させながら練混ぜを行うため、ミキサー内部での材料の拡散挙動がジクロスミキサーよりもダイナミックなものとなり、同一練混ぜ時間でのセメントペーストと骨材の混合状態がより良好なものとなったためと考えられる¹⁶⁾。特に今回のような材料分離が生じるような調査の場合では、ミキサー内部でセメントペーストと骨材がバラバラな挙動を示すことから、一定の回転で練混ぜを行うミキサーよりも、それぞれをよりランダムに拡散混合できるオムニミキサーの方が結果として良好な練混ぜ状況となったものと考えられる。これらの結果から、後述の繊維による保水効果と材料分離の抑制効果も併せて、W/Cには40%を、使用ミキサーにはオムニミキサーを用いることとして以降の検討を進めることとした。

表-3 フレッシュコンクリート試験結果

番号	練り上がり温度(°C)		スランプ値(cm)		フロー値(cm)		フレッシュ状況	
	NF	F	NF	F	NF	F	NF	F
	①	10	7	23.1	0	60×56	20	×
②	15	11	>25	0	64×64	20	△	■
③	10	10	>25	0	61×55	20	△	■
④	10	8	>25	0	64×65	20	×	■
⑤	-	-	>25	4	80×82	-	×	◎
⑥	-	12	-	10	-	-	-	○
⑦	-	-	-	10.1	-	-	-	○
⑧	-	10	-	12.1	-	-	-	○

NF：繊維混入前，F：繊維混入後，

◎：材料分離なく打設可能，○：材料分離はあるが打設可能

×：材料分離，△：材料分離なし，■：スランプ0打設不可

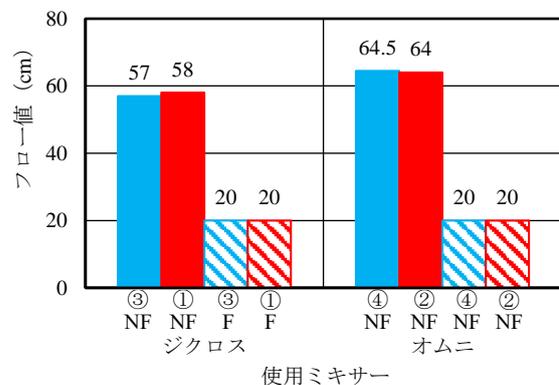


図-2 スランプフロー値とミキサーおよびW/Cの関係図



(a) ①185-0.4-Z (NF) (b) ①185-0.4-Z (F)



(c) ②185-0.4-O (NF) (d) ②185-0.4-O (F)

図-3 フレッシュコンクリート性状

3.2 細径繊維による保水効果

表-3に見られるように、PP 繊維の投入によってフレッシュコンクリートのワーカビリティは著しく悪化する。この原因を確認するため、繊維を単独で水と混練し、その状態を確認した。図-4 は繊維の異なる PP 繊維 15 g に対して、水 45 g を投入して手練りによって攪拌したものである。この図に示すように、繊維度 2.2 dtex×6 mm (四葉断面, 換算直径 18 μm, 比表面積 538000 mm²/g) および 20 dtex×20 mm (四葉断面, 外径 83 μm, 換算直径 52 μm, 比表面積 139000 mm²/g) の細径の場合には、水は完全に PP 繊維中に保持されており、余剰水が確認できなかった。一方、市販品であり一般的に用いられる繊維度 3500 dtex 程度の太径 PP 繊維 (四葉断面, 換算直径 0.7 mm, 比表面積 6350 mm²/g) の場合には、水はほぼ PP 繊維に保持されることはなく、分離した余剰水が確認できた。化学物質としての PP には吸水性がないため、この見かけの保水効果は繊維の表面積が増大したことによる繊維表面への水分の吸着が原因と考えられる。

すなわち、通常のコンクリート調査を考える場合には、材料分離を許容することはできないが、ここで用いるような細径 PP 繊維の場合、繊維表面への吸着水分を考慮する必要があることから、繊維を投入しない段階での材料分離は許容できるものと考えられる。そのため以降の検討では、材料分離が生じる単位水量 250~330 kg/m³ の範囲についても検討を行うこととした。

3.3 異なる単位水量についての検討

①~④での検討で確認されたように、単位水量を 185 kg/m³ と固定した場合には、PP 繊維投入前のフレッシュ性状が十分に流動的であっても、ミキサーの種類や W/C によらず 1 vol.% の PP 繊維混入は流動性の確保が困難であることが確認された。ここでは、前節で確認できたように、細径の場合は PP 繊維そのものによる見かけの保水効果が大きいために、単位水量が不足するものと考え、単位水量を 250 kg/m³ 以上にした場合についての検討を行った。ただし、⑥~⑧のシリーズについては材料投入の順序を変更し、あらかじめ⑤と同量のセメント・水および繊維を投入し、繊維のみが混練された状態のセメントペーストとした後、s/a を一定とした細骨材・粗骨材を所定の量だけ順次投入した。

フレッシュ性状の測定結果は、表-3 に示すとおりである。単位水量とスランプ・スランプフロー値の関係を図-5 に、スランプ試験の状況を図-6 に示す単位水量の増加によって、繊維混入前には、スランプフロー値が大きくなる一方で、図-6(a)に示す写真からもわかるように、単位水量を 250 kg/m³ とした場合には明らかな材料分離が確認できる。しかし、図-6(b)に示す写真のように、PP 繊維を混入した場合には材料分離の発生が抑え

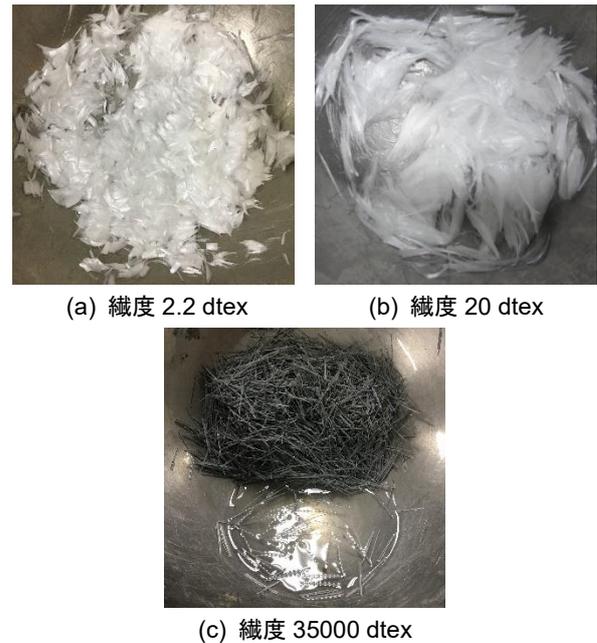


図-4 PP 繊維単体と水の混練状況

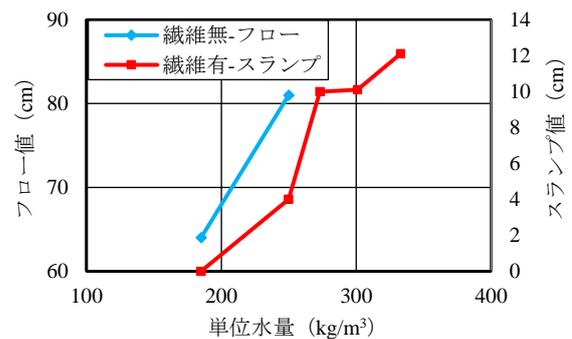


図-5 スランプフロー値と単位水量の関係



図-6 フレッシュコンクリート性状

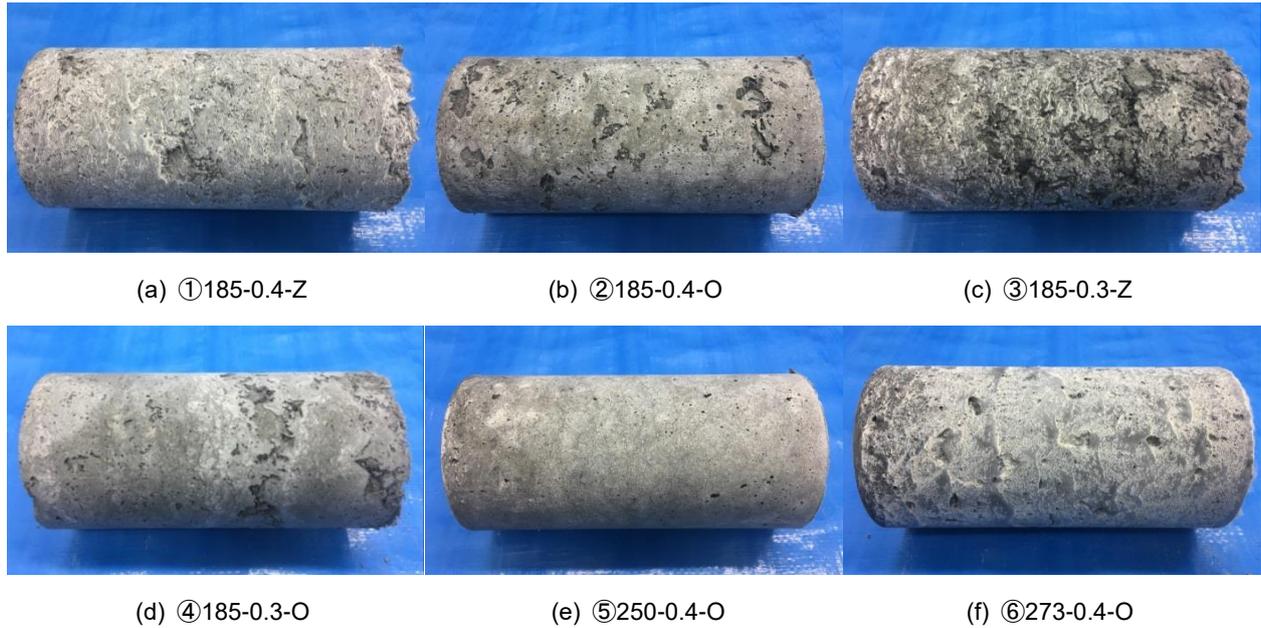


図-7 試験体表面図

られ、4 cm のスランプが生じて打設可能な状態となった。これよりも単位水量の大きい⑥～⑧のシリーズについては、図-6(c), (d)に示すように繊維投入後も材料分離が確認された。このような材料分離については、適切な量の増粘剤を併用することにより回避できる可能性があるが、これは今後の検討課題としたい。これらの試験結果から、細径 PP 繊維を多混入する場合には、繊維そのものの保水効果を考慮して、繊維混入前の段階では材料分離が生じる程度に単位水量を過大なものとする一方で、繊維混入後に適切なワーカビリティが得られるものと考えられる。

3.4 硬化コンクリートの性状観察

ここで得られたコンクリート試験体は 24 時間の湿潤養生を行い、試験体の硬化を確認してから脱型を行い、試験体の表面状態を観察した。①～⑥についての試験体表面の状態を図-7 に示す。これらの写真から明らかなように、繊維の混入によってスランプがゼロとなった①～④の試験体は極めて疎な構造を持ち、表面には大きな空隙が多数あり、木槌などを用いた通常の打設方法の範囲では、十分な締固めが不可能であることが確認できた。その一方で、繊維を混入する前にフレッシュコンクリートには材料分離が生じて、繊維を混入した後にスランプの生じた⑤の試験体では十分な締固めが可能となり、細径 PP 繊維を 1 vol.% まで混入した場合であっても、表面に空隙が少なく密実な試験体を得ることが可能であった。ただし、単位容積質量については明確な傾向が確認できなかった。今後は、微細構造も含め得た硬化体の粗密について検討を行う。さらに、⑥の試験体のように、図-6(c)で確認されるような繊維混入後の材料分離が生

じる場合については、試験体表面にも明らかな材料分離が見られる。そのため、適切な量の繊維混入によってフレッシュ時の材料分離を抑制する必要がある。

4. まとめ

本報告では、細径 PP 繊維を混入するための調査設計および練混ぜ方法に関する検討を行い、水セメント比・単位水量および練混ぜミキサーの種類をパラメータとして取り上げ、フレッシュ性状と打設コンクリートの状態について確認した。以下に得られた知見を示す。

- 1) ジクロスミキサーとオムニミキサーを比較した場合、オムニミキサーの方が大きいスランプフロー値を得ることができる。
- 2) 比表面積が大きい細径 PP 繊維は、繊維表面への水分の吸着のため、見かけの保水性を有する。
- 3) 繊維の混入前には材料分離が生じるコンクリートであっても、細径 PP 繊維の混入によって材料分離が抑えられる場合がある。
- 4) 単位水量を 250 kg/m^3 とした場合、繊維混入前の段階では材料分離が生じるが、細径 PP 繊維を 1 vol.% 混入することによって 4 cm のスランプが生じ、材料分離なく打設可能なコンクリートを得ることができた。

今後は、PP 繊維の比表面積と見かけの保水性の関係の定量的な評価や増粘剤の併用などにより、実用的な調査設計と練混ぜ方法を検討する。また、得られた細径 PP 繊維多混入コンクリートについての収縮や圧縮強度などの基本的な性状を把握するとともに各種性能評価を行い、FRCC で見られる機能・特徴の付与の可能性について検

討を行う。

謝辞

本検討は、JSPS 科研費・基盤研究 (B) (課題番号：17H03337, 代表：西脇智哉) の一部として実施されたものである。また、松川欣司様 (BASF ジャパン株式会社) および小島真一郎様 (仙台コンクリート試験センター株式会社) には、実験に当たり多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Parvizl, S., Faiz, M., Abdulrahman, A.: Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 5, pp. 553-560, Sep./Oct.1995
- 2) 平石剛紀, 坂田昇, 林大介, 山村正人: 剥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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 23, No. 1, pp. 469-474, 2001
- 3) 西田朗, 山崎庸行, 井上秀之: 爆裂防止用短繊維を混入した高強度コンクリートの性状に関する研究, *清水建設研究報告*, Vol. 65, pp. 1-8, 1997.04
- 4) 松尾庄二, 川又篤, 西脇敬一: 高靱性セメント複合材料の断面修復への適用に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 27, No. 1, pp. 307-312, 2005
- 5) 六郷恵哲, 横田弘, 坂田昇, 閑田徹志: 土木学会「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) 設計・施工指針 (案)」の概要, *コンクリート工学*, Vol. 45, No. 3, pp. 3-9, 2007.03
- 6) 吉田理紗, 菊田貴恒, 西脇智哉, 三橋博三: ハイブリッド型繊維補強セメント材料の引張性状に及ぼす繊維の複合効果に関する実験的検討, *セメント・コンクリート論文集*, Vol. 66, pp. 552-559, 2012
- 7) 上野和広, 中塚勇, 石井将幸: 複数微細ひび割れ型

繊維補強セメント複合材料が有するひび割れ分散性の漏水量低減効果, *農業農村工学会論文集*, No. 260, pp. 95-100, 2009.04

- 8) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: 短繊維補強コンクリートの施工性に関する検討, *港湾空港技術研究所資料*, No. 1087, 2004.09
- 9) 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集*, Vol. 28, No. 1, pp. 299-304, 2006
- 10) Laetitia, M., Pierre, R., Nicolas, R.: Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 226-234, 2010
- 11) Da Silva, M.A., et al.: Rheological and mechanical behavior of High Strength Steel Fiber-River Gravel Self Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 150, pp. 606-618, 2017
- 12) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp.244-247, 2015
- 13) JIS A 1132, コンクリートの強度試験用供試体の作り方, 2014
- 14) 大西正志ほか: 螺旋アーム式二軸強制練りミキサ (ジクロス) によるダムコンクリートの練混ぜ実験, *土木学会年次学術講演会講演概要集*, Vol. 64, No. 2, pp. VI-218, 2009
- 15) 草野昌夫, 辻幸和, 新田裕之, 原田修輔: オムニミキサで練り混ぜた高流動コンクリートの品質, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 20, No. 2, pp. 427-432, 1998
- 16) Garlinghouse, L.H., Garlinghouse, R.E.: The Omni Mixer – A New Approach to mixing to Mixing Concrete, *ACI Journal*, No. 69, pp. 220-223, 1972