

## 論文 超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に及ぼす鋼繊維の影響

松原 功明<sup>\*1</sup>・大野 俊夫<sup>\*2</sup>・坂井 吾郎<sup>\*3</sup>・山田 真人<sup>\*4</sup>

**要旨**：近年，海外において圧縮強度  $200\text{N/mm}^2$ を有する超高強度繊維補強コンクリートが開発され，日本国内においても適用実績が増加しつつある。今回，主にエトリングタイトの生成により緻密な硬化体を形成することによって超高強度を達成し，鋼繊維の混入によって曲げ強度，引張強度および靱性を改善した材料が開発された。本報では，本材料中の鋼繊維の長さおよび混入率がフレッシュ性状や強度特性などの諸特性に及ぼす影響を明らかにした。

**キーワード**：超高強度繊維補強コンクリート，鋼繊維，繊維長，ブレンド，強度特性

### 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFCと称す）は，圧縮強度  $200\text{N/mm}^2$ レベルのマトリクスと補強繊維によってコンクリートに高い引張強度を付与し，コンクリートに引張力を負担させる設計を可能とする新材料である。これらの材料は海外において開発され，適用実績も数多いが，近年，日本国内においても適用され始め<sup>1)</sup>，土木学会より「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」が示された。

今回，これらの材料と同等の性能を有するUFC材料が開発された（以下，本UFCと称す）。本UFCは，エトリングタイトの生成とポゾラン材の活性により緻密な硬化体となることによって超高強度を達成し，鋼繊維の混入により曲げ強度，引張強度および靱性を改善したものである。

UFCにおいては，混入する繊維の種類，形状，寸法，混入率がフレッシュ性状および硬化性状に大きく影響を及ぼすため，要求性能を満足するためには，これらを適切に決定することが重要である。一般に，繊維補強コンクリートにおいては，鋼繊維の混入率が高くなるとフレッシュ状態における流動性が低下し，硬化後の曲げ強度が増大する。これに対し，著者らは，流動性の低下を可能な限り抑えつつ，より高い曲げ

強度を得るために，繊維長の異なる繊維をブレンドして混入することを検討している。一般の繊維補強コンクリートにおいては，一部の例外を除き，単一の繊維長の繊維を使用する。複数種類の繊維をブレンドして使用する場合も，異なる材質の繊維をブレンドして使用することによってそれぞれの特徴を併せ持つ材料とすることを目標としたり<sup>2)</sup>，同材質であっても，使用できる繊維長が限られた中で，ある要求性能を満足するために工夫するものであり，ブレンドすることによって単一の繊維長を使用した際の性能を上回るものではない<sup>3)</sup>。

本報では，混入する鋼繊維の長さおよび混入率が，本UFCの諸特性に及ぼす影響を明らかにするとともに，異なる繊維長の繊維をブレンドして混入することについて検討した結果を示す。

### 2. 実験内容

#### (1) 概要

本実験では，本UFCに対して三種類の長さの繊維を様々な混入率で混入し，フレッシュ性状および硬化性状を確認した。

#### (2) 使用材料

本UFCには専用の結合材と骨材を使用した。結合材の化学成分を表-1に示す。また，今回

\*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工修（正会員）

\*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 上席研究員 工博（正会員）

\*3 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員（正会員）

\*4 住友電工スチールワイヤー株式会社 PCシステム部 部長（非会員）

使用した骨材の表乾密度は 2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率は 1.18%であった。今回使用した鋼繊維を写真-1 に示す。この鋼繊維の繊維径は 0.2mmで、2,000N/mm<sup>2</sup>以上の引張強度を有するものである。

### (3) マトリクスの配合

マトリクスの配合を表-2 に示す。マトリクスの配合は、鋼繊維を混入しない場合において、モルタルフロー290mm程度の高い流動性と圧縮強度 200N/mm<sup>2</sup>程度の超高強度を満足できるように事前に検討されたものである。

### (4) 検討ケース

繊維長および繊維混入率（容積%）の組合せを水準とした検討ケースを表-3 に示す。繊維長は 10mm(F10)、15mm(F15)、20mm(F20)の三種類、合計混入率は 1.50%~2.50%の範囲とした。なお、繊維はマトリクス配合に対し外割で混入した。

### (5) 練混ぜ方法

練混ぜには容量 100L の強制二軸ミキサを使用し、1 バッチを 80L とした。まず、結合材および骨材のみを投入し、30 秒練り混ぜ、次に、水、高性能減水剤を投入し、8 分練り混ぜた。その後、ミキサを回転させながら鋼繊維を投入し、投入完了後、2 分間練り混ぜた。練混ぜ直後のコンクリート温度は 23℃~25℃の範囲であった。

### (6) 養生方法

試験体打設後、20℃60%RH

表-3 検討ケース

(鋼繊維長と混入率の組合せ)

No.	F10	F15	F20	合計
1	—	—	—	0.00
2	2.00	—	—	2.00
3	2.50	—	—	2.50
4	0.50	—	1.50	2.00
5	0.75	—	1.25	2.00
6	1.00	—	1.00	2.00
7	—	1.50	—	1.50
8	—	1.75	—	1.75
9	—	2.00	—	2.00
10	—	0.50	1.00	1.50
11	—	0.75	0.75	1.50
12	—	0.75	1.00	1.75
13	—	1.00	0.75	1.75
14	—	1.00	1.00	2.00
15	—	—	1.50	1.50
16	—	—	1.75	1.75
17	—	—	2.00	2.00



写真-2 V漏斗試験器

の環境下で養生し、材齢 20~24 時間にて脱型後、蒸気養生を実施した。蒸気養生パターンを図-1 に示す。これは、表-2 に示した本UFCの配合にて、200N/mm<sup>2</sup>レベルの圧縮強度を得られるように事前に検討された養生方法である。

### (7) 試験項目

試験項目を表-4 に示す。なお、試験規格において ( ) で示した項目は、( ) 内の試験規格を参考にしたものである。フレッシュ性状については各 1 回の試験を実施した。モルタルフローで流動性、V 漏斗流下時間で間隙通過性を評価し、これらは繊維の混入前後で測定した。V 漏斗試験器を写真-2



写真-1 鋼繊維

曲げ強度  
用供試体  
は 40×40

表-1 結合材の化学成分

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
33.4	6.4	2.8	51.1	2.4	0.7

mass%

表-2 使用配合

使用材料	水	結合材	骨材	高性能減水剤
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	193*	1287	905	38.6 (P×3.0%)

\*単位水量には高性能減水剤の水分を含める

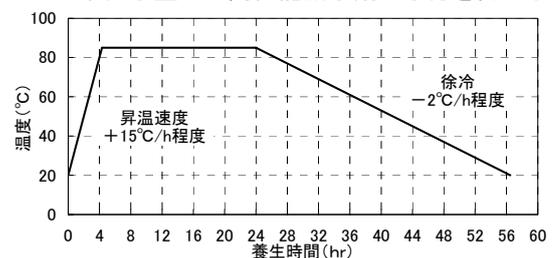


図-1 蒸気養生パターン

表-4 試験項目

試験項目		試験規格	備考
フレッシュ性状	モルタルフロー	(JIS R 5201)	落下運動なし
	モルタルV漏斗流下時間	—	吐出口30×30mm
	空気量	JIS A 1128	—
	練上り温度	—	温度計による
硬化性状	圧縮強度	φ100×200mm 各3本 JIS A 1108	—
	曲げ強度	40×40×160mm 各4本 (JSCE-G 552)	左記試験規格を参考にした4点曲げ試験
	およびひび割れ本数	100×100×400mm 各4本 JSCE-G 552	
			単繊維のケースのみ実施

×160mm を基本とし、単種類の繊維を混入したケースでは、たわみを計測することを主な目的とし、100×100×400mm の供試体についても実施した。なお、40×40×160mm の供試体では最大荷重に達するまで、100×100×400mm の供試体では中央点変位が 2.5mm 程度となるまで載荷し、除荷後の供試体底面のひび割れ本数を測定した。40×40×160mm の供試体の載荷方法を図-2 に示す。

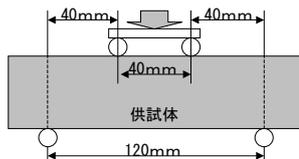


図-2 曲げ試験  
(40×40×160mm)



写真-3 モルタルフロー

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 単種類繊維使用の結果

##### (1) フレッシュ性状

モルタルフロー試験状況を写真-3 に示す。本実験においては様々なケースの繊維混入率を検討したが、全ケースにおいて、施工上問題となるような繊維の偏りやファイバーボールは発生せず、モルタルフロー状況は概ね写真に示すとおり良好であった。なお、繊維混入前のモルタルフローは 276~306mm、V 漏斗流下時間は 23.4~30.3 秒の範囲であった。

繊維混入率とモルタルフロー低下率の関係を図-2 に示す。ここで、モルタルフロー低下率とは、繊維混入前後のモルタルフローの差を繊維混入前のモルタルフロー値で除した値である。図に示すとおり、繊維長が 15mm および 20mm の繊維を混入した場合、繊維混入率が高くなるにしたがってモルタルフロー低下率が高くなる結果となり、10mm の繊維を混入したケースは、今回実施した混入率の範囲では、繊維混入率がモルタルフロー低下率に及ぼす影響は小さい結果となった。同一の混入率の場合、繊維長が短くなると混入される繊維の本数は多くなるが、今回の結果より、本 UFC の流動性には、混入される繊維の本数よりも、繊維長の影響の方が大

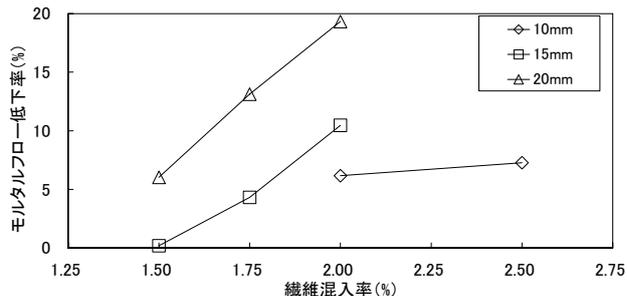


図-2 繊維混入率とモルタルフロー低下率

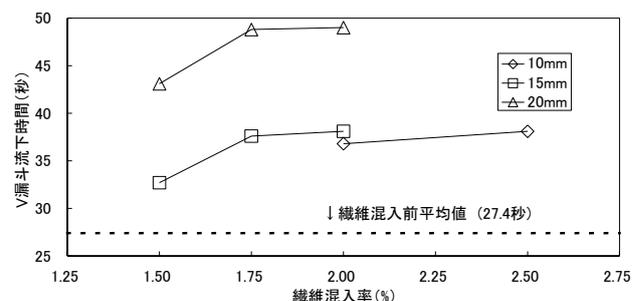


図-3 繊維混入率とV漏斗流下時間

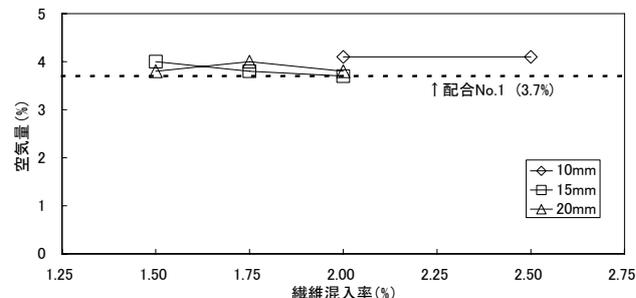


図-4 繊維混入率と空気量

きいことが明らかとなった。これは、混入される繊維数が増加するよりも、繊維長が長くなる方が、流動中の繊維同士の干渉が大きくなることによるものと考えられる。

繊維混入率とV漏斗流下時間の関係を図-3 に示す。図中には、繊維混入前に測定したV漏斗流下時間の平均値も示した。図に示すとおり、繊維混入率が高くなるにしたがってV漏斗流下時間が長くなり、間隙通過性が低くなる結果となった。また、繊維混入率 2.00%においては、繊維長が 10mm と 15mm の繊維を使用した場合を比較すると大きな差はなく、繊維長が 20mm となると間隙通過性が低くなる結果となった。これは、流動性に対する影響と同様に、混入される繊維数が増加するよりも、繊維長が長くなる方が、繊維同士の干渉が多くなることによるものと考えられる。

繊維混入率と空気量の関係を図-4に示す。図中には、繊維を混入しない配合(No.1)の空気量測定結果も示した。図に示すとおり、繊維混入率によらず空気量は3.7~4.1%とほぼ一定であった。このことから、繊維の混入にともなう空気量の増加傾向はみられないと考えられた。

## (2) 硬化性状

圧縮強度は $192\text{N/mm}^2 \sim 202\text{N/mm}^2$ の範囲であり、今回検討した範囲では、繊維混入率の圧縮強度への影響は明確には確認できなかった。

曲げ強度試験結果の例として、繊維混入率を2.00%としたケース(No.2,9,17)の曲げ試験結果を図-5に示す。図中には、応力-たわみ関係の線形区間が終了し、ひび割れが発生したと考えられる位置を示した。図に示すとおり、混入した繊維の繊維長に関わらず、ひび割れ発生強度はほぼ同等であり、繊維長が長い方が、ひび割れ発生後の強度増進が大きいことが明らかとなった。一般に、ひび割れ発生後の曲げ試験においては、引張縁から上部へのひび割れの進展に伴い、ひび割れに架橋する繊維が増加していく一方、繊維の破断や完全な引拔けを起こした繊維は次々と応力を伝達しなくなる。本UFCにおいては破断よりも引拔けが支配的で、かつ、繊維長が長い方が付着や摩擦によって応力を負担する時間が長いため、応力を伝達する架橋繊維の累計本数が多くなり、このような結果となると考えられる。なお、いずれの繊維を用いても、最大曲げ応力に達した後の応力の低下は緩やかで、高い靱性を有する結果となった。

繊維混入率と曲げ強度の関係を図-6および図-7に示す。一般的なコンクリートと同様、供試体の大きさが小さい( $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ )の方が、曲げ強度が大きくなる結果となった。なお、繊維を混入しない配合(No.1)の曲げ強度は、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の供試体で $19.5\text{N/mm}^2$ 、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体で $15.7\text{N/mm}^2$ であった。図に示すとおり、両試験体において、全体的な傾向として、繊維混入率が高くなるにしたがって、曲げ強度が高くなる結果となった。ただし、

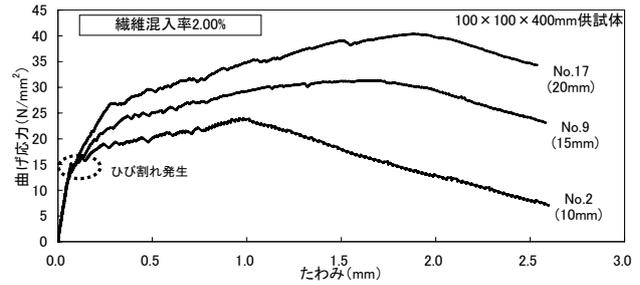


図-5 曲げ試験結果例

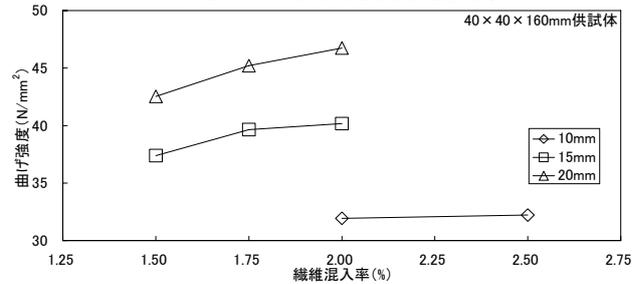


図-6 繊維混入率と曲げ強度(その1)

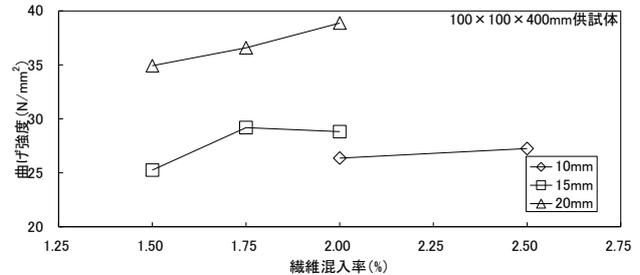


図-7 繊維混入率と曲げ強度(その2)

両試験体とも、繊維長10mmで混入率2.00%と2.50%、および繊維長15mmで混入率1.75%と2.00%の曲げ強度はほぼ同等であり、曲げ強度に頭打ち傾向が認められ、混入する繊維の繊維長によって、達成できる曲げ強度に限界があると考えられた。さらに、本実験の範囲においては、繊維混入率の増加による曲げ強度の増加量よりも、繊維長の増加による曲げ強度の増加量の方が大きい結果となった。これは、前述と同様、繊維長が長い方が、架橋繊維の累積本数が多いためと考えられる。

繊維混入率と曲げ試験に供試体底面のひび割れ本数の関係を図-8および図-9に示す。 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の供試体は最大荷重までの荷重であるが、繊維補強コンクリートの曲げ試験においては、最大荷重後の新たなひび割れの発生はほとんどない<sup>4)</sup>とされている。図に示すとおり、いずれの大きさの試験体においても、繊維長

15mmおよび20mmを使用した試験体においては、繊維混入率 1.75%において最もひび割れ本数が増える結果となった。これは、曲げ試験時のひび割れ分散性が優れていることを示している。ひび割れ発生後、繊維混入率が低い場合、ひび割れに架橋する繊維数が少なく、十分な応力を伝達することができないため、急激に繊維が引抜け、ひび割れ幅の進展を抑制できず、ひび割れが分散しない。繊維混入率が適当であれば、繊維によって応力がひび割れ間を完全に伝達され、等曲げ区間のほかの箇所新たなひび割れが発生し、この繰返しで、多数のひび割れが発生する。また、ひび割れ発生後、繊維周辺のマトリクスには繊維の引抜けに抵抗する応力が発生するが、繊維混入率が高すぎる場合、繊維周辺のマトリクス中の応力発生範囲に別の繊維が存在する確率が高くなる。その結果、繊維とマトリクスの界面で応力が不連続となるため、その箇所ですべりが生じたり、応力発生範囲を共有することで、繊維の引抜けに対するマトリクスの抵抗力を十分に発揮できないことなどにより、ひび割れ幅の進展を抑制できず、ひび割れが分散しないと推察される。

### 3.2 ブレンド繊維使用の結果

繊維長 15mm と 20mm の繊維をブレンドして混入した際の、モルタルフローの変化を図-10、曲げ強度の変化を図-11 に示す。図-10 に示すとおり、合計混入率 1.75% と 2.00% のケースにおいては、15mm の繊維が多くなるほど (20mm の繊維が少なくなるほど) モルタルフローが大きくなる結果であり、合計混入率が高いほど、その傾向が強くなった。これは、図-2 で示したとおり、合計混入率が高い方が、より流動性に与える影響が大きいため、繊維長の変化による影響も顕著であると考えられる。なお、合計混入率 1.50% としたケースでは、明確な傾向は確認できなかった。また、図-11 に示すとおり、一部ばらつきはあるものの、概ね、15mm の繊維が多くなるほど (20mm の繊維が少なくなるほど)

曲げ強度が小さくなる結果となった。

繊維長 15mm と 20mm の繊維を使用したケース (No.8~17, 繊維混入率: 1.50%~2.00%) において、繊維混入によるモルタルフロー低下率と曲げ強度の関係を図-12 に示す。図中には、各データの配合 No. と、単種類の繊維のみを使用したケースの試験結果を近似した直線を示した。図より、15mm よりも 20mm の繊維を単独使用した方が、同一モルタルフロー低下率に対する曲げ強度が大きい傾向にあることが分かる。また、図中の点線で示した範囲は、二種類の繊維をブ

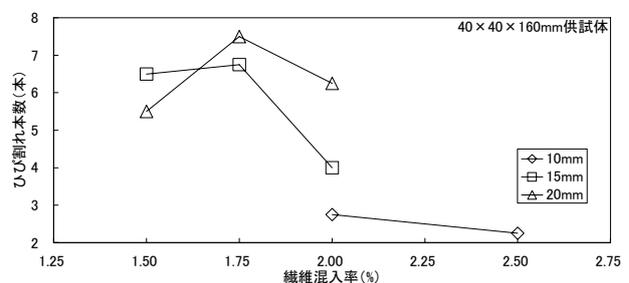


図-8 繊維混入率と曲げひび割れ本数(その1)

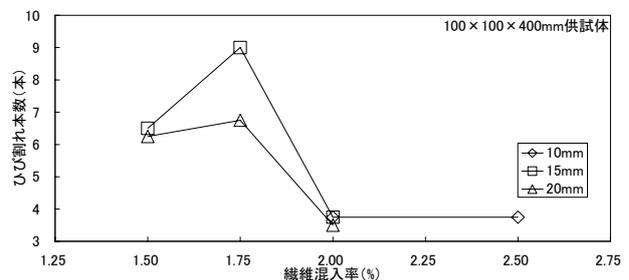


図-9 繊維混入率と曲げひび割れ本数(その2)

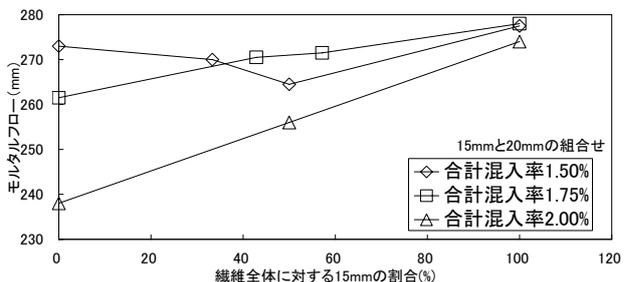


図-10 繊維ブレンドとモルタルフロー

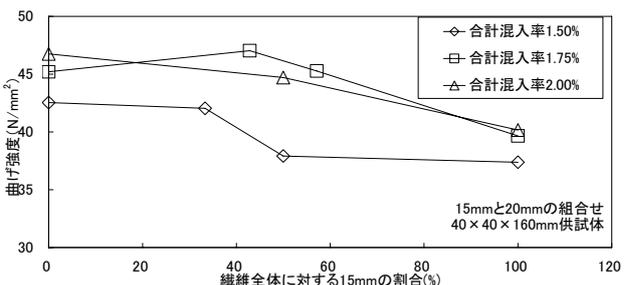


図-11 繊維ブレンドと曲げ強度

ブレンドして使用した場合であり、繊維混入率は1.75%以上となっている。これより、それぞれの繊維を単独で使用した場合よりも、二種類の繊維で、一定の混入量以上の繊維を混入した場合の方が、より流動性の低下を抑えつつ、高い曲げ強度が得られる領域があることが分かった。

繊維長 10mm と 20mm の繊維をブレンドして使用したケース (No.4~6, 繊維混入率: 2.00%) と、繊維長 15mm の繊維のみを使用したケースの、モルタルフロー低下率と曲げ強度の関係を図-13 に示す。図中には、各データの配合 No. と、繊維長 15mm の繊維のみを使用したケース (No.7~9) の試験結果を近似した直線を示した。図中の点線で示した範囲のとおり、二種類 (10mm および 20mm) の繊維長の繊維をあるブレンド率で混入した場合 (No.5: 10mm を 0.75%, 20mm を 1.25%), それらの繊維長の平均の長さ (15mm) の繊維を混入しても達成できない領域 (流動性の低下が小さく、曲げ強度の増加が大きい領域) が確認された。

図-12 および図-13 に示す傾向については、より詳細な検討が必要であるが、二種類の繊維を混入する場合、流動性と曲げ強度の関係において、効率的に曲げ強度を得られる領域が存在するが、最適なブレンド率については、混入する繊維の繊維長で異なっている。最適なブレンド率とすることによって、流動性の低下が小さく、高い曲げ強度を得られると推察される。

#### 4. まとめ

本実験の結果、本 UFC について、鋼繊維の混入が諸特性に及ぼす影響を検討した結果、次のことが明らかとなった。

- ① フレッシュ性状において、繊維の混入率が高くなるにしたがい流動性および間隙通過性は低下し、その影響は、混入する繊維の繊維長が長いほど大きい。
- ② 繊維混入率が高いほど曲げ強度は増大するが、その増大には限度がある。また、曲げ強度の増大には繊維長の影響が大きい。

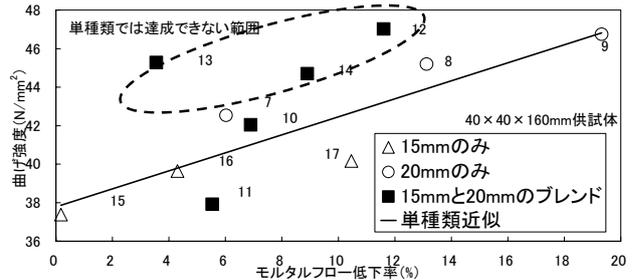


図-12 モルタルフロー低下率と曲げ強度 (その1)

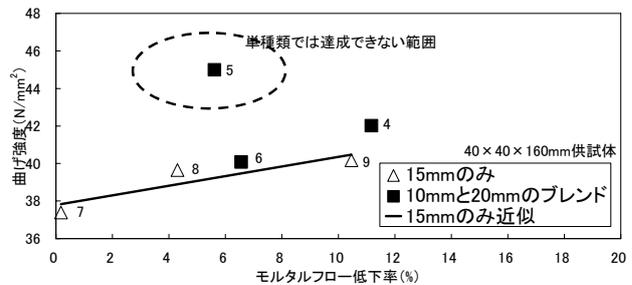


図-13 モルタルフロー低下率と曲げ強度 (その2)

- ③ 繊維長 15mm および 20mm の繊維を使用した場合、繊維混入率を 1.75% とした際に最もひび割れ本数が多く、ひび割れ分散性が高い。
- ④ 繊維長の異なる二種類の繊維を混入した場合、流動性と曲げ強度の関係において、それぞれを単独で使用した場合よりも流動性の低下が小さく、高い曲げ強度が得られる最適ブレンド率が存在することが確認された。

#### 参考文献

- 1) 武者浩透, 大竹明朗, 児玉明彦, 小林忠司: 超高強度コンクリート系新素材「ダクタル」を用いた PC 橋梁の設計・施工 - 酒田みらい橋 -, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.2, pp.40-48, 2003.3
- 2) 松沢晃一, 橋高義典, 田村雅紀: ハイブリッド型短繊維補強コンクリートの破壊特性に及ぼす繊維種類の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.333-338, 2004
- 3) 工藤俊一, 奈良 裕, 佐藤昭市: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性試験結果, 生コン技術大会研究発表論文集, Vol.11, pp.151-154, 2001
- 4) 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版