

鋼繊維補強高強度モルタルの基礎的性状

栗田 守朗
(技術研究所)
塩屋 俊幸
(技術研究所)
林 秀彦
(技術研究所)
別所 友宏
(土木本部)

§ 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCと呼ぶ）は、コンクリートの持つもろさを改善し、じん性を著しく高めた複合材料であり、地下構造物やトンネルのライニング、舗装（空港、道路）の増厚、各種構造物の補修・補強などに利用されている¹⁾。SFRCに用いられている鋼繊維は、長さが20~60mm、直径が0.3~0.8mmで、アスペクト比が40~80程度であり、鋼繊維の混入率としては1%（体積比）程度が最も一般的に使用されている¹⁾。

一方、SFRCの高性能化を図る研究・開発が二つの方向で進められている。一つは、施工性を向上させる目的で高流動コンクリートを指向したものであり、他方は硬化コンクリートの性状を著しく向上させることを指向したものである。

前者は、トンネルやシールドトンネルの施工法の一つであるECL（Extruded Concrete Lining）工法の一次覆工コンクリートに適用するために開発されたものであり、鋼繊維を体積比で1%混入した高流動コンクリートが実際のシールド工事に使用されている²⁾。

後者は、鋼繊維の混入率を大幅に高めることによりじん性を大幅に改善したコンクリートである。この範疇に分類される高じん性を指向した材料としては、ECC³⁾（Engineered Cementitious Composites）、SIFCON⁴⁾（Slurry Infiltrated Fiber Concrete）、SIMCON⁵⁾（Slurry Infiltrated Mat Concrete）、そしてCRC⁶⁾（Compact Reinforced Composite）が挙げられる。

ECC³⁾は、水結合材比20%程度で、混和材としてシリカフェームを用いた結合材に短繊維を容積比

で6%程度以上混入して製造した高強度繊維補強材料である。SIFCON⁴⁾は、容積比で10%以上の短鋼繊維を型枠内にあらかじめ充てんし、後からペースト等を注入して作製した材料である。SIMCON⁵⁾は、比較的長い繊維（アスペクト比500以上）をフィルター状マットにし、その中にペースト等を注入して作製した材料である。CRC⁶⁾は、短鋼繊維の混入率を6~12%と高め、結合材としてはセメント、シリカフェームと粉体系の高性能減水剤をブレミックスした結合材を使用し、水結合材比を16%程度とした超高強度を有する鋼繊維補強材料である。

上記に示したような鋼繊維の混入率を大幅に高めることによりじん性を高めた鋼繊維補強材料は、コストが高く作業性に制約が多いことなどから構造物に部分的に使用することが効果的であり、例えば、プレキャスト部材の接合部、柱梁接合部等への適用可能性が高いと考えられる。

本研究は、鋼繊維の混入率を高めた鋼繊維補強高強度モルタルの一つであるCRCについてその基本的な諸性状を実験的に検討し、さらに、プレキャスト部材継手部に適用した場合の耐力実験を実施し、その挙動を検討したものである。

§ 2. 実験概要

2.1 実験の種類

実験は以下の2種類について実施した。

- ・鋼繊維補強高強度モルタルの基本性状把握実験
鋼繊維の混入率がモルタルのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響を把握することを目的とし

た。要因は鋼繊維混入率と細骨材の種類である。鋼繊維の混入率は3, 6, そして9%の3水準とし, 細骨材はデンマーク産および日本産の2種類とした。実験の組合せを表-1に示す。

鋼繊維混入率 (%)	細骨材の種類	
	デンマーク産	日本産
3	○	-
6	○	○
9	○	-

表-1 実験の組合せ

・継手部耐力実験

鋼繊維補強高強度モルタルをプレキャスト部材継手部に用いた試験体の耐力を把握することを目的とし, 継手部のない試験体との比較を行う。プレキャスト部材は港湾構造物であるケーソンを対象とした⁷⁾。

2.2 鋼繊維補強高強度モルタルの
基本性状把握実験

2.2.1 使用材料

使用材料の一覧を表-2に示す。使用した結合材は, セメント, マイクロシリカフューム, およびナフタレン系の高性能減水剤(粉体)をプレミックスしたものであり, DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultra-fine Particles)セメントと呼ばれている⁶⁾。

DSPセメントは, 粒径が $0.5 \sim 100 \mu\text{m}$ の範囲のセメントと $50 \text{ \AA} \sim 0.5 \mu\text{m}$ の超微粒子であるマイクロシリカフュームを組み合わせることでシリカフュームがセメント粒子の間隙を埋め, また, それ自体のボールベアリング作用により粒子間の抵抗が低減される材料である。

2) 細骨材

・デンマーク産細骨材 (DSと呼ぶ)

石英質の細骨材であり, 粒径の異なる3種類の細骨材を所定の割合で混合して使用した。粒径は $0 \sim 0.25\text{mm}$, $0.25\text{mm} \sim 1\text{mm}$, $1\text{mm} \sim 4\text{mm}$ の範囲にそれぞれある。DSは絶乾状態で試験に供した。

3種類の細骨材の混合割合は鋼繊維の混入率により若干変化させている。すなわち, 鋼繊維混入率が

高くなるにしたがい $1\text{mm} \sim 4\text{mm}$ の範囲の細骨材を少なくしている。

・日本産細骨材 (JSと呼ぶ)

静岡県浜岡産の陸砂である。日本産の細骨材とデンマーク産の細骨材を比較すると, デンマーク産細骨材の粒度は日本産細骨材のそれよりも若干荒く, 0.15mm 以下の割合が約2%と日本産細骨材よりも細粒分が少ないところに特徴がある。JSは表面乾燥飽水状態で試験に供した。なお, 両細骨材とも土木学会の細骨材の粒度の標準を満足している(図-1参照)。

3) 鋼繊維

使用した鋼繊維は, 直径 0.4mm ×長さ 12mm , アスペクト比30のstraight steel fiberである。

4) 水

練混ぜ水としては水道水を用いた。

2.2.2 練混ぜ方法

パン型の強制練りミキサ(50l)を用い, 約25lのモルタルを製造した。練混ぜ方法は, 結合材お

使用材料	諸物性
結合材	DSPセメント, 比重: 3.15
細骨材	
デンマーク産	
0~0.25 mm	石英質系細骨材, 比重: 2.64, 吸水率: 0.21%
0.25~1 mm	石英質系細骨材, 比重: 2.64, 吸水率: 0.23%
1~4 mm	石英質系細骨材, 比重: 2.62, 吸水率: 0.71%
日本産	陸砂, 比重: 2.59, 吸水率: 1.63%, 粗粒率: 2.80
鋼繊維	straight steel fiber (直径 0.4mm , 長さ 12mm) 引張強さ $1350\text{N}/\text{mm}^2$

表-2 使用材料

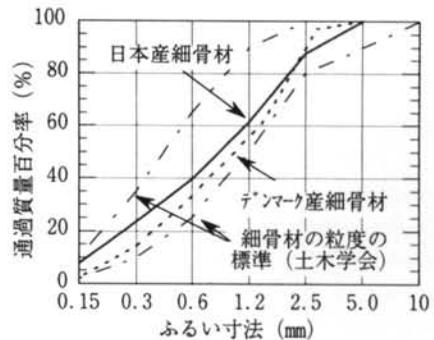


図-1 細骨材の粒度分布

よび細骨材を投入後 90 秒間の空練りを行い、水を投入後 5 分間練混ぜる。その後、鋼繊維を約 30 秒間で投入し、その後 2 分間練混ぜを行った。練混ぜ時間は合計 9 分間である。

2.2.3 試験方法・試験項目

1) フレッシュモルタルの試験

- ・スランプ試験：JIS A 1101 による。
- ・温度：棒状温度計による。

2) 硬化モルタルの試験

・圧縮強度試験： $\phi 100\text{mm} \times h 200\text{mm}$ の円柱供試体を作製し、試験材齢まで標準養生し、材齢 7 日および 28 日で JIS A 1108 に準じて試験した。また、材齢 28 日ではコンプレッソメータを用いてヤング係数の測定を行った。

・曲げ強度および曲げタフネス試験： $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を作製し、試験材齢まで標準養生し、材齢 28 日で JSCE-G 552 に準じて曲げ強度および曲げタフネス試験を実施した。

なお、圧縮強度試験用供試体および曲げ強度試験用供試体は振動テーブルを用いて作製した。

2.2.4 配合

試験に供した配合を表-3 に示す。配合の記号は以下の通りである。

- DS-3：デンマーク産細骨材，鋼繊維混入率 3%
- DS-6：デンマーク産細骨材，鋼繊維混入率 6%
- DS-9：デンマーク産細骨材，鋼繊維混入率 9%
- JS-6：日本産細骨材，鋼繊維混入率 6%

	配合の種類			
	DS-3	DS-6	DS-9	JS-6
水結合材比 W/B	0.15	0.16	0.17	0.16
砂結合材比 S/B	1.38	1.29	1.20	1.29
鋼繊維 (vol%)	3	6	9	6

表-3 鋼繊維補強高強度モルタルの配合

2.3 継手部耐力実験

2.3.1 試験体の形状寸法および鋼材配置

1) 試験体設計の基本

引張鋼材比は曲げ破壊させるためと実際の構造物に近い鋼材比である 0.5% とした。部材高さは 500mm とし、港湾構造物を想定してかぶりを約 60mm とした。また、施工の容易さを考慮して重ね継手部の鉄筋間隔はできるだけ離し、打継面は目荒しを行って

いない。

2) 試験体

試験体の形状寸法と鋼材配置を図-2～4 に示す。

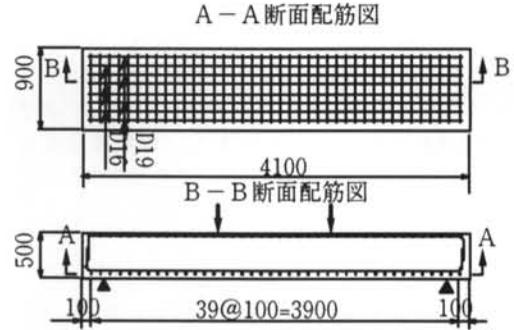


図-2 N 試験体配筋図

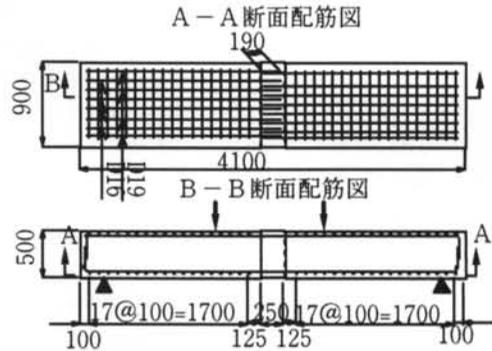


図-3 J6 試験体配筋図

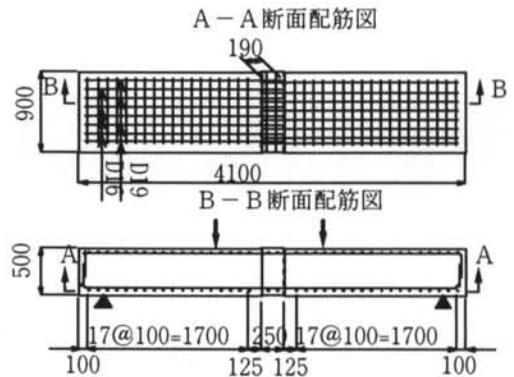


図-4 J6-R 試験体配筋図

各試験体の特徴を以下に示す。

- ・N 試験体：継手無し、普通強度のコンクリート ($f'_c \approx 27\text{N/mm}^2$) を使用している。
- ・J6 試験体：継手長さを 10ϕ (ϕ ：太い方の鉄筋径, D19) とし、鋼繊維補強高強度モルタル (鋼繊維混入率 6%) を継手部に用いた試験体。継手間隔は鉄筋中心間隔で 50mm である。
- ・J6-R 試験体：J6 試験体と同じ構造である。継手部に鋼繊維補強高強度モルタル (鋼繊維混入率 6%) を用いており、さらに継手部を横方向鉄筋で補強した試験体である。

2.3.2 使用材料

1) プレキャストコンクリート部材

・プレキャスト部材の作製に用いたコンクリートの配合強度は 24N/mm^2 であり、その配合を表-4 に示す。

- ・粗骨材：津久井都城山・八王子美山混合砕石、粗骨材の最大寸法：20mm，比重：2.64，粗粒率：6.63
- ・細骨材：旧相模川水系・千葉県君津産の砕砂，比重：2.58，粗粒率：2.80
- ・セメント：早強ポルトランドセメント
- ・鉄筋：SD345

D16：降伏点：349N/mm²，引張強さ：513N/mm²

D19：降伏点：371N/mm²，引張強さ：538N/mm²

2) 鋼繊維補強高強度モルタル

継手部に用いた鋼繊維補強高強度モルタルの配合を表-5 に示す。この配合は、2.2 鋼繊維補強モルタルの基本性状把握実験で得られた結果を参考にし、施工性を考慮して鋼繊維混入率を 6% とした配合である。使用材料は 2.2.1 で示したものと同一である。

2.3.3 締固め方法

継手部における鋼繊維補強高強度モルタルの締固めには高周波バイブレーターを用いた。このモルタルは粘性が非常に大きいが生硬に締固めを行うことにより密実に充てんできることが確認された。

2.3.4 養生方法

試験体は作製後材齢 2 日までは湿布養生とし、それ以降は載荷試験時まで現場気中養生とした。

2.3.5 載荷方法

支持条件は両端単純支持とし、二点曲げ載荷とした。加力方法を図-5 に示す。載荷方法は単調荷重増加方法とし、以下の手順で実施した。

- 第 1 サイクル：設計荷重 300kN まで加力後徐荷。
- 第 2 サイクル：破壊荷重まで。

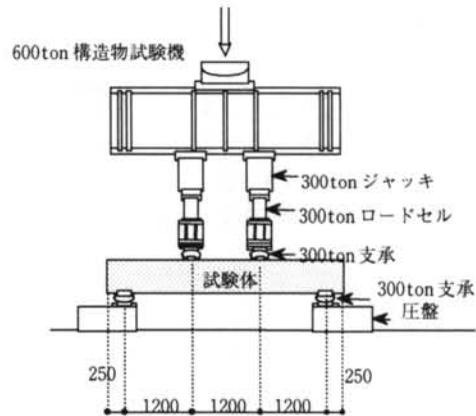


図-5 加力方法 (単位：mm)

目標圧縮強度 (N/mm ²)	スランプ [*] (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
27	12	62	44.6	166	268	810	1030	0.67

表-4 プレキャスト部材のコンクリートの配合

目標圧縮強度 (N/mm ²)	スランプ [*] (cm)	水結合材比 W/B (%)	砂セメント比 S/B	鋼繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	結合材 B	細骨材 S	鋼繊維
130	15	15.7	1.24	6	150	957	1186	477

表-5 プレキャスト部材の接合部に用いた鋼繊維補強高強度モルタルの配合

§ 3. 実験結果および考察

3.1 鋼繊維補強高強度モルタルの基本性状把握実験結果

3.1.1 フレッシュな性状

試験に供した鋼繊維補強高強度モルタルのフレッシュ時の試験結果を表-6に示す。鋼繊維混入率とスランプの関係を図-6に示す。鋼繊維混入率が増加するにしたがいスランプは小さくなり、鋼繊維混入率が3%の場合はスランプが24cmで材料分離のない流動性に優れた性状を有していた。一方、9%の場合はほとんどスランプしない性状であった。これは、3種類の配合ともペースト量はほぼ一定であるため、鋼繊維の混入率が高くなるにしたがい鋼繊維に拘束されるペーストが多くなり、流動性に寄与するペーストが少なくなることによりスランプが小さくなったものと考えられる。すなわち、鋼繊維混入率の増加が流動性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。一方、日本産細骨材を用いたモルタルのスランプは約16cmであり、デンマーク産細骨材を用いた場合より若干大きくなったが、その差は小さい。なお、フレッシュな性状の目視観察の結果ではあるが、施工性に適した鋼繊維の混入率の上限は6%程度であろうと考えられる。また、鋼繊維混入率が9%と高い場合でもファイバーボールの発生は見られず、鋼繊維は良好に分散されているものと考えられる。

練上り直後のモルタルの温度は27℃程度と高くなった。その理由は、パン型のミキサを用いて練り

混ぜを行ったため、練混ぜ中における鋼繊維補強高強度モルタルとミキサ内面との摩擦熱によるものと考えられる。摩擦が生じていることはミキサにかかる負荷が大きくなることを意味する。したがって、ミキサの負荷を低減し、練混ぜ中におけるモルタル温度の上昇を防ぐにはパン型のミキサよりも二軸強制練りミキサのほうが優れているものと考えられる。試験的に二軸強制練りミキサを用いて同じ配合条件で練混ぜた結果、モルタルの練上り温度は20℃程度であり、温度の上昇は認められず、また、フレッシュおよび硬化後の物性にも顕著な差異は認められなかった。

3.1.2 硬化後の性状

硬化後の鋼繊維補強高強度モルタルの試験結果を表-6に示す。

1) 圧縮強度特性

鋼繊維混入率と圧縮強度の関係を図-7に示す。圧縮強度は鋼繊維混入率の増加に伴い若干増加する

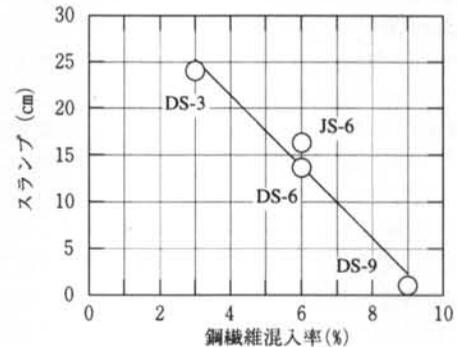


図-6 鋼繊維混入率とスランプ

	配合の種類			
	DS-3	DS-6	DS-9	JS-6
水結合材比 W/B	0.15	0.16	0.17	0.16
砂結合材比 S/B	1.38	1.29	1.20	1.29
鋼繊維混入率 (vol%)	3	6	9	6
スランプ (cm)	24.0*	13.7	1.0	16.3
温度 (°C)	26.0	25.0	28.0	24.0
	材齢28日 (7日)	材齢28日 (7日)	材齢28日 (7日)	材齢28日 (7日)
圧縮強度 (N/mm ²)	128 (98.4)	129 (100)	131 (103)	125 (103)
単位容積質量 (t/m ³)	2.58 (2.57)	2.75 (2.75)	2.90 (2.90)	2.76 (2.75)
ヤング係数 (kN/mm ²)	48.9	49.1	49.8	45.5
曲げ強度 (N/mm ²)	17.6	20.9	24.2	22.3
換算曲げ強度 (N/mm ²)	11.7	14.0	16.8	15.7

*1: スランプフロー: 45.5 cm × 44.0 cm

表-6 試験結果

傾向が認められる。材齢7日で約 100N/mm^2 、材齢28日で約 130N/mm^2 の圧縮強度が得られ、材齢7日から材齢28日の圧縮強度の伸びは約30%であった。また、材齢28日におけるヤング係数は $46\sim 50\text{kN/mm}^2$ であり、通常のコンクリートのヤング係数よりも50%程度大きい。

2) 単位容積質量

鋼繊維混入率と材齢28日の鋼繊維補強高強度モルタルの単位容積質量との関係を図-8に示す。鋼繊維混入率と単位容積質量は高い相関があり、鋼繊維混入率3%で約 2.6t/m^3 、9%で約 2.9t/m^3 であった。

3) 曲げ特性

鋼繊維混入率と曲げ強度、換算曲げ強度の関係を図-9に示す。鋼繊維混入率の増加にともない曲げ特性は向上することがわかる。曲げ強度は鋼繊維混入率3%で約 18N/mm^2 、6%で約 22N/mm^2 、9%で約 24N/mm^2 得られている。一般的に使用されている鋼繊維混入率1%程度の鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度は $5\sim 8\text{N/mm}^2$ であることから¹⁾、本実験で用いた鋼繊維補強高強度モルタルは3倍以上の曲げ強度特性を有していることがわかる。

鋼繊維混入率が荷重-変位曲線に及ぼす影響を図-10に示す。鋼繊維混入率が増加するに伴いじん性が改善されていることがわかる。

細骨材の相違が曲げ特性に及ぼす影響については、曲げ強度はほぼ同等であり、曲げ試験における荷重-変位曲線を比較すると(図-11参照)、荷重-変位曲線は細骨材の相違に係わらずほぼ同様な挙動を示している。したがって、今回用いた2種類の細骨材を用いたモルタルにおいては、その相違が曲げ

特性に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

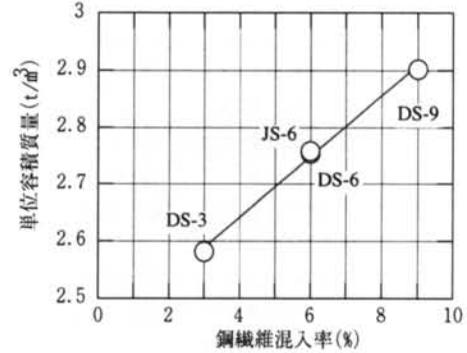


図-8 鋼繊維混入率と単位容積質量

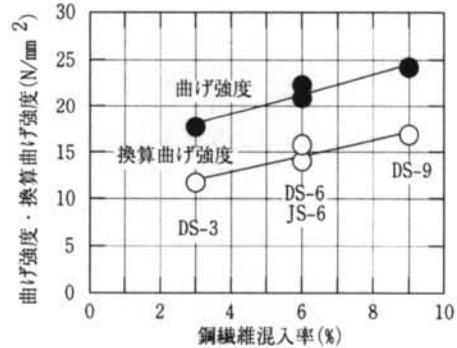


図-9 鋼繊維混入率と曲げ特性

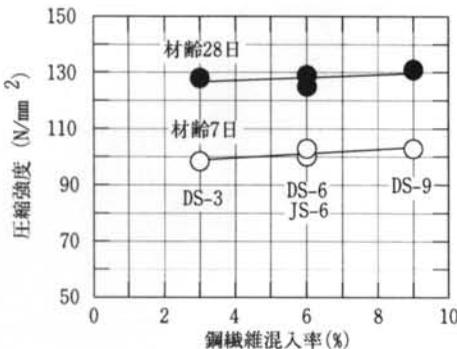


図-7 鋼繊維混入率と圧縮強度

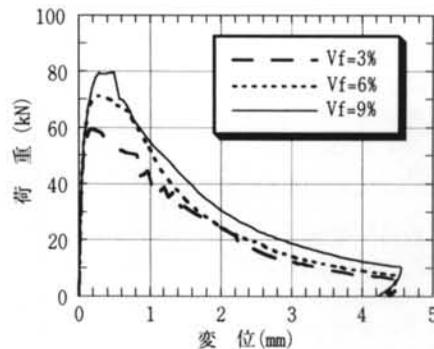


図-10 鋼繊維混入率と荷重-変位曲線

3.2 継手部耐力実験結果

3.2.1 実験結果一覽

表一七に載荷試験時におけるコンクリートの試験結果の一覽を示す。また、表一八に各試験体における載荷試験結果を示す。なお、表一八においては、各実験結果には自重分の荷重は含まれていない。また、荷重とは2点載荷の合計荷重である。

3.2.2 破壊過程

図一12~14に各試験体のひび割れ状況を示す。主要なひび割れは全て曲げスパンに生じており、そのひび割れは有効高さdの約半分の間隔で発生している。継手部を有する試験体(J6, J6-R試験体)の曲げひび割れ荷重は継手部の無い試験体(N試験体)のそれと同等以上であった。また、全ての試験体において最大耐力時に主鉄筋降伏後、圧縮縁コンクリートの圧壊が生じていた。

3.2.3 変位挙動

図一15に荷重と中央変位の関係を示す。最大荷重はN試験体が最も大きい。各試験体は計算最大耐力を満足しており、耐力的には問題がないことが明らかとなった。部材降伏後の変形はなだらかであることから曲げ破壊であることがわかる。実験では最大荷重を確認した後徐荷したが徐荷時の剛性は全試験体ともほぼ同じであった。

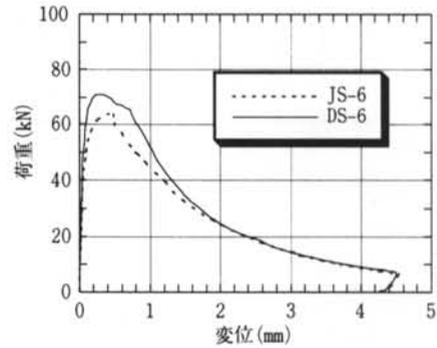
図一16に各試験体の初期剛性を示す。初期剛性は継手の無いN試験体が最も大きく、継手のある試

験体は加力前からひび割れがあるような状況であったため初期剛性が小さくなっていった。ただし、設計荷重である300kNくらいになるとN試験体にもひび割れが発生し剛性は各試験体ともほとんど同じとなる。

3.2.4 鋼材のひずみ挙動

図一17および図一18にJ6試験体における荷重と継手面の鉄筋ひずみおよび荷重と打継部中央の鉄筋ひずみの関係をそれぞれ示す。

鉄筋は打継面近傍で降伏しており、試験体の最大荷重は主鋼材の降伏で決定されていることが確認された。また、鋼繊維補強高強度モルタルを用いた場



図一11 細骨材の種類と荷重-変位曲線

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
N	29.6	2.78	—	20.8
J6 (PCa部)	29.5	2.66	—	24.3
J6 (継手部)	130	—	25.4	49.6
J6-R(PCa部)	26.3	2.63	—	22.6
J6-R(継手部)	134	—	23.0	48.1

表一七 載荷試験時のコンクリートの試験結果

試験体名	曲げひび割れ 荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)		降伏変位 (mm)	最大荷重 (kN)		最大変位 (mm)
	実験値	計算値	実験値	実験値	計算値	実験値	実験値
N試験体	100	452	510	9	536	598	158
J6試験体	150	452	450	9	536	567	160
J6-R試験体	100	452	—	8	536	572	158

表一八 載荷実験結果

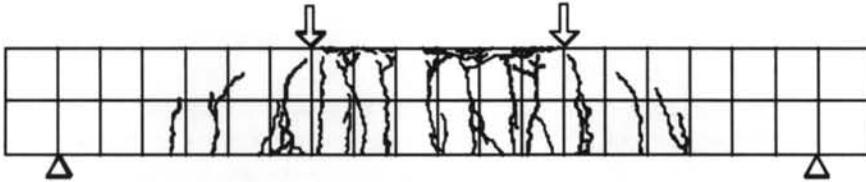


図-12 N 試験体ひび割れ状況

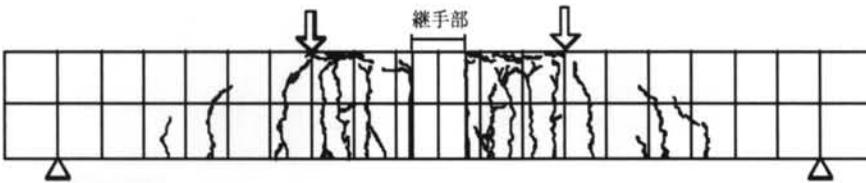


図-13 J6 試験体ひび割れ状況

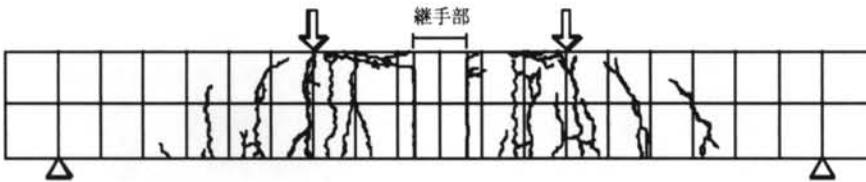


図-14 J6-R 試験体ひび割れ状況

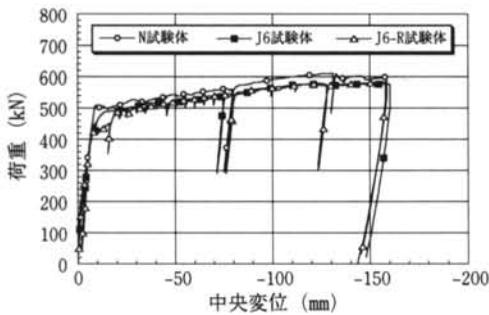


図-15 荷重と中央変位の関係

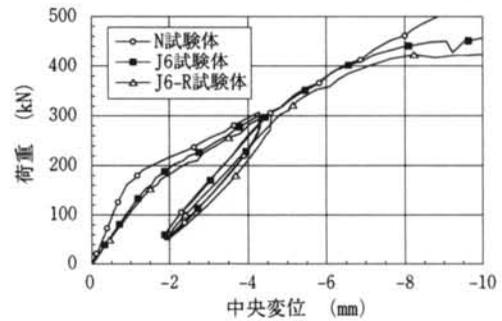


図-16 初期剛性

合は打継面では鉄筋は降伏しているが、打継部中央の鉄筋位置では最大荷重時においても降伏しておらず、 10ϕ の重ね継手長があれば耐力的には十分であることが確認された。

3.2.5 普通強度コンクリートおよび鋼繊維補強高強度モルタルのひずみ挙動

図-19にJ6試験体における普通強度コンクリート部の圧縮縁ひずみを、図-20に同じくJ6試験体の鋼繊維補強高強度モルタル部の圧縮縁ひずみを示す。普通強度コンクリート部の圧縮縁ひずみは最大荷重時において -4000μ ～ -5000μ の値を示しており、最終的にこの部分が圧壊した様子がわかる。一方、鋼繊維補強高強度モルタル部の圧縮縁ひずみは最大荷重時で -400μ 程度であった。これは、普通強度コンクリート部のその1/10程度であり、圧縮破壊に対しては十分に余裕がある材料であることがわかる。

§ 4. まとめ

本研究は、鋼繊維の混入率を高めた鋼繊維補強高強度モルタルの基本的な力学的性状を実験的に検討し、さらに、プレキャスト部材継手部にこの材料を適用した場合の耐力実験を実施し、その挙動を検討した。本実験の範囲で得られた知見をまとめると以下のようである。

1) フレッシュなモルタルのコンシステンシーは鋼繊維混入率の影響を大きく受ける。鋼繊維混入率3%の場合はスランブは24cmであるが、9%になるとスランブはほぼゼロとなった。継手部への打込み状況から判断すると、鋼繊維の混入率は6%程度(スランブとして15cm程度)が限界であると考えられる。

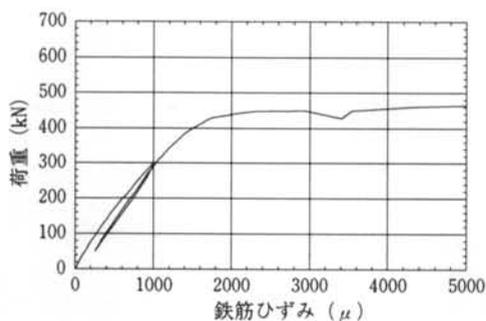


図-17 荷重と鉄筋ひずみ (J6試験体打継面)

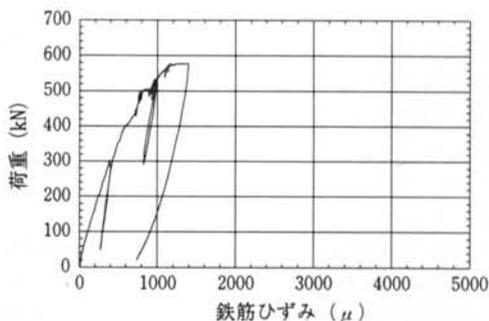


図-18 荷重と鉄筋ひずみ (J6試験体打継部中央)

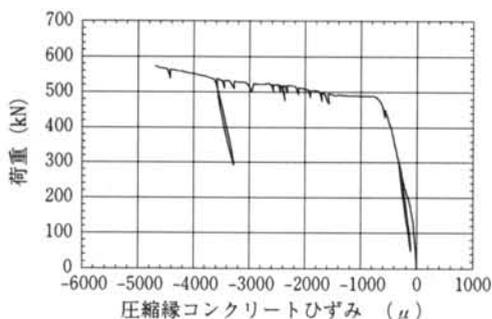


図-19 普通強度コンクリート部の圧縮縁ひずみ (J6試験体)

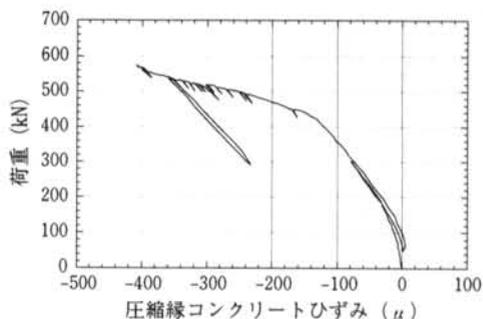


図-20 鋼繊維補強高強度モルタル部の圧縮縁ひずみ (J6試験体)

2) 圧縮強度は材齢 28 日で約 130N/mm²であり、鋼繊維混入率の相違は圧縮強度にほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

3) 曲げ特性は、鋼繊維混入率の増加にともない改善される。鋼繊維混入率が 3%～9%の範囲では材齢 28 日の曲げ強度は 15～22 N/mm²であり、鋼繊維混入率 1%程度の従来の鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度を大きく上回っている。

4) 打継部に鋼繊維補強高強度モルタル（鋼繊維混入率 6%）を用いた試験体の最大荷重は継手部のな

い試験体のそれよりも小さいが、両者ともに計算最大耐力を満足しており、耐力的には十分であることが確認された。

5) 鋼繊維補強高強度モルタル（鋼繊維混入率 6%）を継手部に用いた試験体は、打継部では鉄筋は降伏しているが、打継部中央の鉄筋位置では最大荷重時においても降伏していないことが明らかとなった。したがって、10φ（φ：鉄筋の直径）の重ね継手長があれば耐力的には十分であることが確認された。

<参考文献>

- 1) (社) 鋼材倶楽部・SFRC 構造設計施工研究会編：“鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル（トンネル編）”，技報堂出版，1995
- 2) 原田俊作・渋谷都男・栗田守朗：“鋼繊維を混入した高流動コンクリートを用いた ECL 工法”，土木技術，pp.52-58，1996.
- 3) 林秀彦・橋大介・金子佳生・稲田泰夫：“短鋼繊維高混入モルタルの諸性状”，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16-1，pp.1123-1128，1994
- 4) Lankard, D.R.：“Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)”，Concrete International, Vol.6, No.12, pp.44-47, 1984.12
- 5) Hackman, L.E., Farrell, M.B., and Dunham, O.O.：“Slurry Infiltrated Mat Concrete(SIMCON)”，Concrete International, Vol.14, No.12, pp.53-56, 1992.12
- 6) Bache, H.H.：“Concrete and Concrete Technology in a broad Perspective”，CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, 1995
- 7) 塩屋俊幸・栗田守朗・別所友宏・辻秀夫：“鋼繊維補強高強度モルタル、H形鋼を用いたプレキャストコンクリート継手”，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19-2, pp.1305-1310, 1997