

# 論文 複数微細ひび割れ型コンクリートにより被覆した鋼管の曲げ破壊性状とひび割れ性状

山下 賢司\*1, 藤元 安宏\*2, 林 承燦\*3, 六郷 恵哲\*4

**要旨:** 粗骨材入り複数微細ひび割れ型コンクリート (DFRCC) により鋼管を被覆した供試体の曲げ載荷試験を行い、マイクロSCOPEによりひび割れの変化を観察した。その結果、普通コンクリートや鋼繊維補強モルタルに比べ、DFRCCにより被覆し、軸方向筋を配置した供試体では、ひび割れ本数が多く、ひび割れ幅は小さく (0.15mm 以下)、優れたひび割れ性状を示した。

**キーワード:** DFRCC, 複数微細ひび割れ型コンクリート, 鋼管, ひび割れ性状

## 1. はじめに

引張力下あるいは曲げモーメント下において複数の微細ひび割れを生じ、大きな引張変形能を示すセメント系複合材料<sup>1) 2)</sup>が開発され、実構造物への適用も始まっている。こうした材料は、ひび割れ幅が小さいため止水材や防食材としての利用が期待されるとともに、大きな引張変形に追随できるため鋼材の被覆材としての利用が期待されている。被覆材として利用する場合、大変形時に鋼材との一体性を確保するには、ずれ止めの配置が有効である<sup>3)</sup>。被覆材としての利用を進める上では、ひび割れ性状や破壊性状を明らかにしておく必要がある。

本研究では、円筒状の鋼管をコンクリートで被覆した棒状供試体の曲げ載荷試験を行い、破壊性状ならびにひび割れ性状について検討した。本研究で用いた複数微細ひび割れ型コンクリートは、曲げ試験において複数微細ひび割れを生じる材料であるので DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites: 以下 DF) に含まれる。この研究の特徴は以下のとおりである。

- ・ 粗骨材を有し練混ぜに特別の配慮を必用としない複数微細ひび割れ型コンクリート (DF) を用いた。鋼繊維補強モルタル (SF) ならび

に普通コンクリート (NC) も用いた。

- ・ 鋼管とコンクリートとの一体性を確保するため、鋼管の表面にスパイラル状の鉄筋 (スパイラル筋) と軸方向の鉄筋 (軸方向筋) を溶接して配置した。
- ・ 中空円形断面の供試体に加え、中空正方形断面の供試体や鋼管のみの供試体も作製した。

主な検討内容は次のとおりである。

- ・ コンクリートの種別、鉄筋配置ならびに断面形状が、供試体の破壊性状 (耐力, 変形, 剛性) ならびにひび割れ性状 (幅, 本数) に及ぼす影響について検討した。
- ・ マイクロSCOPEを用いてひび割れの変化を連続的に観察し、DF のひび割れ性状の特徴について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

鋼管の被覆材として使用した SF および NC の配合を表-1 に示す。DF マトリクスには、プレミックスされたポリマーセメントモルタルの試作品 (単位水量: 238kg/m<sup>3</sup>) を用いた。水結合材比 (W/B) は 30%とした。DF の構成を通常のコンクリートに近づけるために粗骨材 (寸法: 12~

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 (株)ピーエス三菱 技術本部 (正会員)

\*3 (株)デーロス メンテナンス事業本部 工博 (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-1 SF および NC の配合

種類	W/C (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )							
		W	C <sup>1)</sup>	S <sup>2)</sup>	G <sup>3)</sup>	Ad <sup>4)</sup>	Vd <sup>5)</sup>	Exp <sup>6)</sup>	Fib <sup>7)</sup>
鋼繊維補強モルタル(SF)	47	220	445	1411	-	8.16	0.57	25	1%
普通コンクリート(NC)	55	182	331	863	863	0.98	-	-	-

1)早強ポルトランドセメント(3.12g/cm<sup>3</sup>), 2)揖斐川産砂利(2.59g/cm<sup>3</sup>), 3)揖斐川産玉砕石(2.61g/cm<sup>3</sup>)

4)SF: 高性能 AE 減水剤, NC: AE 減水剤, 5)メチルセルローズ系増粘剤

6)膨張剤(デンカパワー-CSA): セメントに置換, 7)鋼繊維 φ0.6×30mm, 体積比

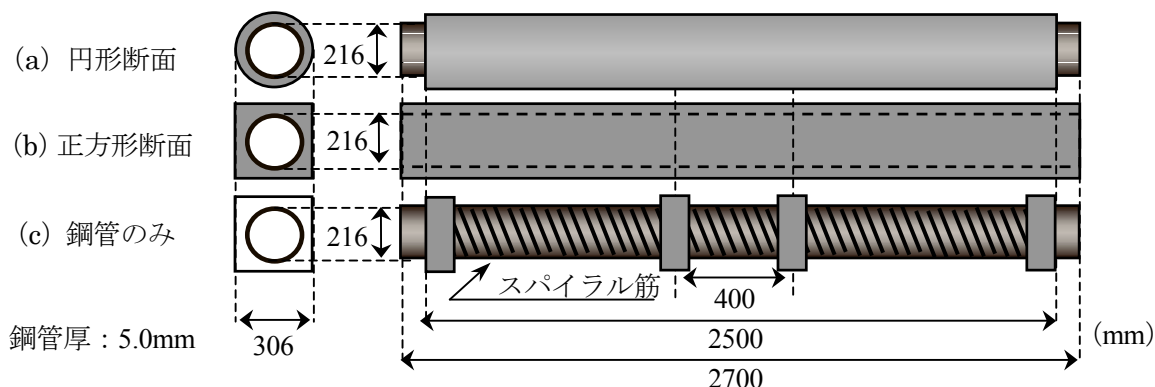


図-1 鋼管供試体の形状

14mm, 単用量: 350 kg/m<sup>3</sup>) を混入した。繊維には, 長さ 12mm (直径 φ=40 μm) と 6mm (直径 φ=26 μm) の PVA (polyvinyl alcohol) 繊維を使用した。繊維混入率は体積比で 2% 混入した。SF および NC においては, W/C をそれぞれ 47% と 55% とした。SF では繊維長 30mm, 換算直径 φ0.6mm のインデント付きストレート型鋼繊維を, 体積比で 1% 混入するとともに, 膨張材も混入した。練り混ぜには, 通常の強制練ミキサ (容量 0.1m<sup>3</sup>) を用いた。DF では, 材料を一括投入して練り混ぜ, 型枠の都合により 3 回に分けて打設した。コンクリートの物性値を表-2 に示す。

## 2.2 供試体および荷重試験方法

供試体の形状を図-1 に, 供試体の作製条件を表-3 に示す。供試体は各条件とも 1 体ずつとした。鋼管には, 一般構造用炭素鋼鋼管 (降伏点  $\sigma_y=240\text{MPa}$  以上, 引張強さ  $\sigma_u=410\text{MPa}$  以上) を使用した。鋼管の寸法は, 内径 206mm, 厚さ 5mm および長さ 2600mm とした。被覆部分のコンクリートの寸法は, 厚さ 45mm, 長さ 2500mm とした。鋼管と被覆コンクリートのずれ止めとして, 写真

表-2 コンクリートの物性値

		SL	Air	Ec	f <sub>c</sub>	f <sub>b</sub>
DF	1 回目	20.0	9.7	16.9	28	7.0
	2 回目	19.7	-	16.5	28.7	7.0
	3 回目	19.9	-	18.4	29.3	7.4
SF		17.0	7.4	28.7	40.2	6.9
NC		5.8	4.0	26.4	30.3	5.4

SL: (cm) Air: (%)

Ec: φ10×20cm による弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

f<sub>c</sub>: φ10×20cm による圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

f<sub>b</sub>: 10×10×40 cm による曲げ強度 (N/mm<sup>2</sup>)

材齢: 1 ヶ月, 試験体数: 3 本

図-1 に示すようにスパイラル筋を 50mm 間隔で配置し, さらに軸方向筋を 6 本配置した。鉄筋は D6 と D10 を用いた。DF により被覆した鋼管供試体は, DF-1~DF-4 供試体と名づけた。SF および NC により被覆した供試体は, SF 供試体および NC 供試体とした。比較用に鋼管のみの供試体 (SP 供試体) も作製した (表-3 参照)。脱型後, 試験材齢 (21~30 日) までは実験室内 (室温 10~20°C 程度) において湿布養生を行った。

荷重試験概要を図-2 に示す。荷重方法は 4 点

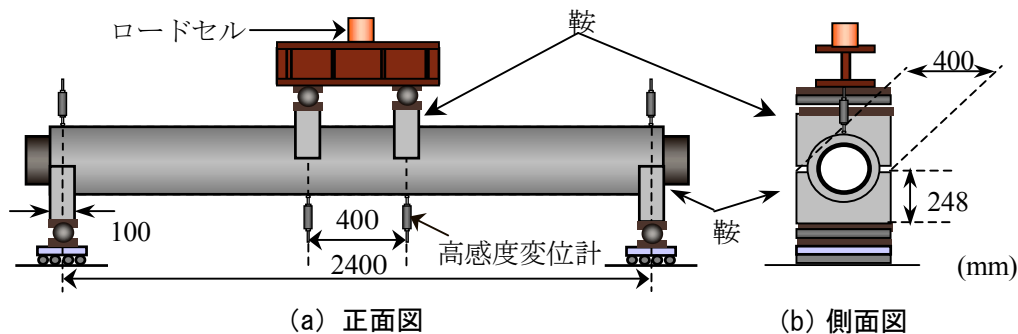


図-2 荷重試験概要

曲げ荷重とした。試験時には、荷重（容量 300kN または 500kN のロードセルを使用）と荷重点変位（ストローク 25mm, 精度 1/500mm を使用）を計測した。荷重点と支点には、U 字型の鞍を用いた。

### 2.3 ひび割れ観察

供試体のひび割れ観察にマイクروسコープ（VH - 5000, Keyence 社製）を用いた。観察区間は、等曲げモーメント区間（400mm）とした。供試体下端近くに、供試体軸方向に線を引き、それに沿ってカメラを移動させた。カメラの倍率は、煩雑さと実用性を勘案して 25 または 50 倍とした。試験直前に、ひび割れを観察したが、すべての供試体においてひび割れは観察できなかった。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 材料強度試験結果（曲げ試験）

曲げ強度試験用供試体（100×100×400mm）の曲げ荷重－変位曲線（DF, SF について 3～4 個の平均値）を図-3 に示す。DF では、初期ひび割れ発生後、荷重の増加を伴う擬似ひずみ硬化挙動がみられ、供試体には複数微細ひび割れが確認された。

### 3.2 供試体の破壊性状

供試体の曲げ試験より得られた実験結果を表-4 と図-4（荷重－変位曲線）に示す。図-4（a）には被覆材の違い（DF-1, SF, NC 供試体）を、（b）には鋼管の配筋の違い（DF-1, DF-2, DF-3 供試体）を、（c）には断面形状（DF-1, DF-4, SP 供試体）の違いをそれぞれ示した。図-4（a）からわかるように最大荷重は DF-1 供試体が SF 供試

表-3 供試体の作製条件

供試体呼び名	被覆材種類（回目）	断面形状	配筋	
			スパイラル筋	軸方向筋
DF-1	DF(1)	円形	D10	D10
DF-2	DF(2)	円形	D10	-
DF-3	DF(3)	円形	D6	D6
DF-4	DF(3)	正方形	D10	D10
SF	SFRM	円形	D10	D10
NC	普通コン	円形	D10	D10
SP	-	円形	D6	-



写真-1 鋼管配筋状況

体および NC 供試体よりも 1 割弱大きくなった。また、DF-1 供試体では、除荷時の荷重－変位曲線（除荷曲線）の傾きが若干緩くなり、除荷後の残留変位もわずかながら小さくなる傾向を示した。DF-1 供試体では、複数微細ひび割れが確認されており、それにより鋼材の降伏を遅らせていると考えられる。

図-4（b）からわかるように、DF-1 供試体および DF-2 供試体に比べ、配筋の径が小さい DF-3 供試体において、最大荷重は 1 割強小さな値を示した。図-4（c）に示すように最大荷重は DF-4 供

試体>DF-1 供試体>SP 供試体の順に高い値を示した。また、表-4 に示すように、断面を円形から正方形断面にすることで最大荷重は26%、荷重-変位曲線の初期勾配は40%程度向上した。図-4 (b) や図-4 (c) にみられる最大荷重の差の理由として、被覆したコンクリートや太いスパイラル筋 (D10) により鋼管の変形を拘束し、圧縮側の座屈をおくらせることが、最大荷重 (曲げ耐力) の増加に寄与していると考えられる。この点については、今後、実験的および解析的に検討する予定である。

### 3.3 供試体のひび割れ性状

図-5 に最大ひび割れ幅と変位の関係を、図-6 にひび割れ本数と変位との関係を示す。SF においては、ひび割れ観察が十分行われておらず、図-5 中の最大ひび割れ幅 (3 点) のみ示した。図-5 に示すように供試体の最大ひび割れ幅は、軸方向筋を有する DF-1 供試体および DF-3 供試体において特に小さく、最大荷重時においても 0.15mm 以下となった。軸方向筋を配置していない DF-2 供試体では、変位が 10mm 程度で、ひび割れの急激な増加が確認でき、最大荷重時において、幅が 2mm 弱のひび割れが観察された。このことより、軸方向筋は、ひび割れ幅の増加を抑制している可能性があるが、この点についてはさらに検討が必要である。本研究では、変位 10mm 程度において、荷重-変位曲線に顕著な折れ曲がりが見られることから、変位 10mm 程度にて、ひび割れ幅の比較を行った。なお、荷重-変位曲線の折れ曲がりは、鋼材の降伏に起因するものだと考えられるが、さらに検討する予定である。NC 供試体では、ひび割れ幅が早い段階 (変位 5mm 程度) から増加し始めていることが確認できたが、DF 供試体では、ひび割れ幅はさほど増加せず、ひび割れ本数が増加した。SF 供試体では、最大荷重時において、最大ひび割れ幅と同程度のひび割れが数本確認されたのに対して、DF 供試体では、最大ひび割れ幅以外のひび割れは微細であった。表-4 ならびに図-6 に示すように、DF 供試体では変位 10mm (荷重-変位曲線の折れ曲がり部分に相当)

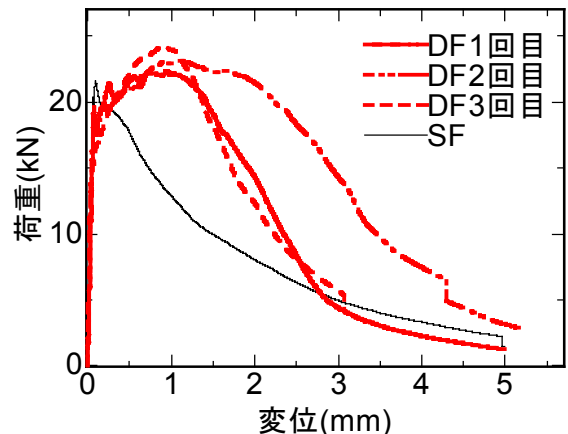


図-3 DF および SF の曲げ試験結果

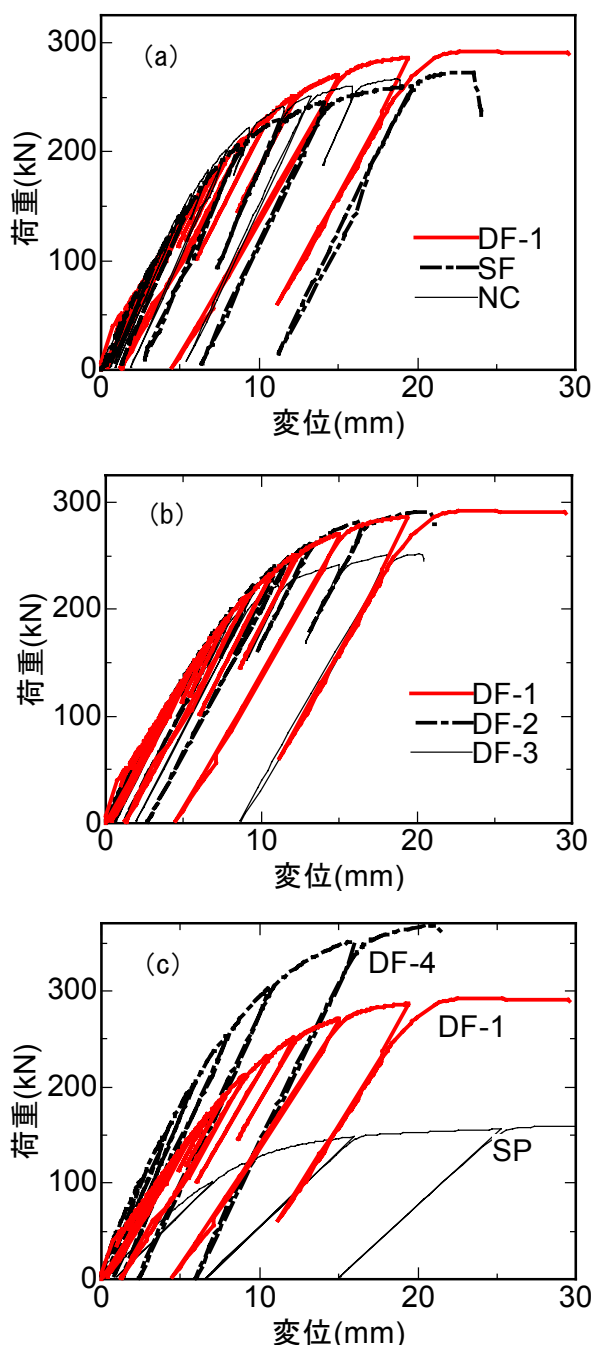


図-4 供試体の荷重-変位曲線

表-4 供試体の実験結果

供試体 呼び名	破壊性状			ひび割れ性状					
	最大荷重 (kN)	最大荷重 時の変位 (mm)	初期剛性 (kN/mm)	変位 5mm 時		変位 10mm 時		最大荷重時	
				幅(mm)	本数(本)	幅(mm)	本数(本)	幅(mm)	本数(本)
DF-1	292	23.4	28.7	0.05	5	0.06	10	0.13	10
DF-2	291	20.3	28.5	0.08	8	0.24	10	1.73	13
DF-3	251	20.1	28.5	0.09	20	0.13	23	0.11	27
DF-4	368	20.8	39.5	0.12	5	0.21	9	0.91	10
SF	272	22.8	29.7	-	-	0.23	-	0.60	-
NC	267	18.7	30.1	0.17	6	0.57	6	1.09	6
SP	160	32.1	16.1	-	-	-	-	-	-

幅: 観察した最大ひび割れ幅

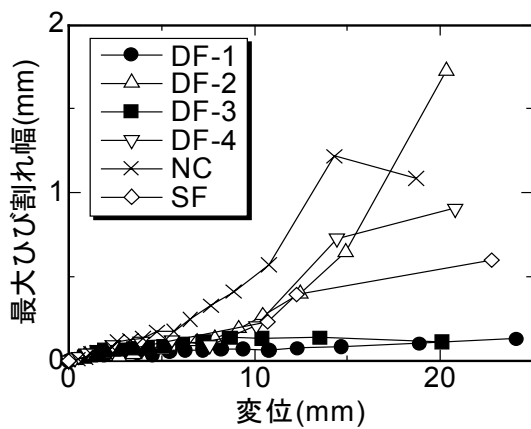


図-5 最大ひび割れ幅-変位関係

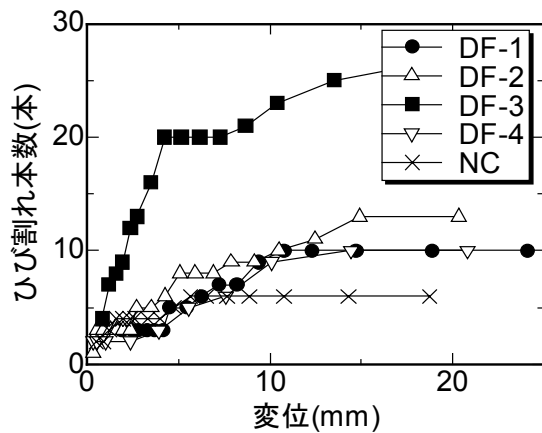
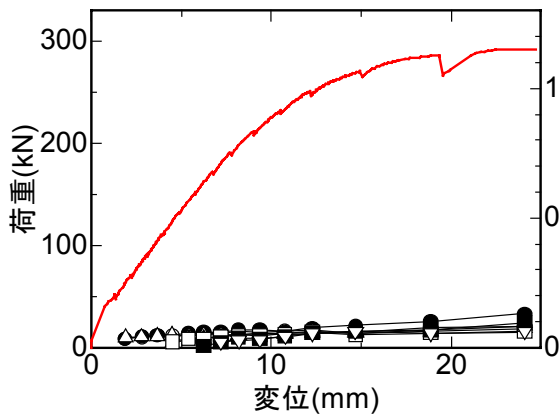
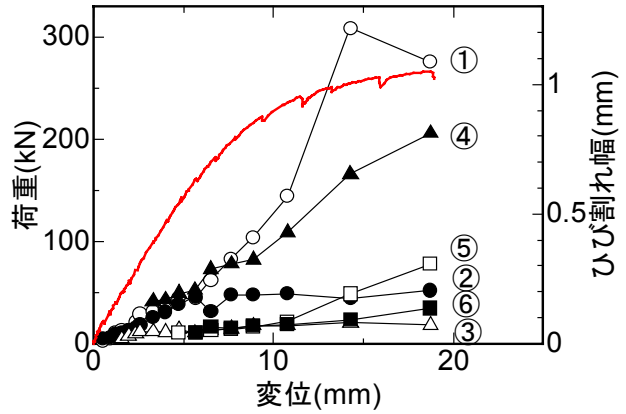


図-6 ひび割れ本数-変位関係



(a) DF-1 供試体



(b) NC 供試体 (图中番号はひび割れ確認順)

図-7 DF-1 および NC のひび割れ幅-変位関係

程度で 10 本程度 (またはそれ以上) のひび割れが確認できた。また、NC 供試体においては、変位が 6mm 程度より、ひび割れ本数は 6 本のみで増加しなかった。図-7 に同じ配筋条件 (D10 のスパイラル筋と軸方向筋) の DF-1 供試体ならびに NC 供試体のひび割れ幅と変位の関係を示す。

NC 供試体はすべてのひび割れを、DF-1 供試体は 7 本目までのひび割れを観察し表示した。図中には荷重-変位曲線の包絡線も載せた。同図からわかるように NC 供試体において、ひび割れ幅は大きく、最大で 1.3mm 程度となった。しかし、DF-1 供試体における最大ひび割れ幅は、最大荷重時に



においても 0.15mm 程度であった。NC 供試体および SF 供試体では、荷重の進行に伴い、コンクリート片の剥離や剥落が確認されたが、DF 供試体では確認できず、優れたひび割れ性状を示した。

### 3.4 マイクロ스코ープによるひび割れ観察

マイクロ스코ープ（倍率 50 倍）による DF-2 供試体のひび割れ観察状況を写真-2 に示す。写真-2 (a) では、目視では検出困難な幅 0.02mm 程度のひび割れが確認できた。写真-2 (b) では繊維が引抜けていることが概ね確認できる。

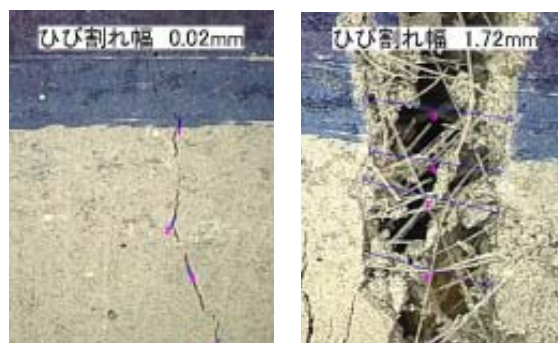
## 4. おわりに

粗骨材入り複数微細ひび割れ型コンクリート (DF) により鋼管を被覆した供試体の曲げ試験を行い、破壊性状とひび割れ性状について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) NC 供試体や SF 供試体に比べ DF 供試体では、除荷曲線の傾きが若干緩くなり、除荷後の残留変位もわずかながら小さくなった。
- (2) 供試体の断面形状を円形から正方形に変えることにより、耐力は 26%、初期勾配は 40%程度向上した。
- (3) 荷重の進行に伴って、NC 供試体では、ひび割れ本数が増えずにひび割れ幅が拡大するのに対し、DF 供試体ではひび割れ幅は拡大せず、ひび割れ本数が増えた。
- (4) 軸方向筋を配置した円形の DF 供試体において変位 10mm 程度では、ひび割れ本数は 10 本以上で、ひび割れ幅は 0.15mm 以下と微細であり、欠け落ちることなく優れたひび割れ性状を示した。
- (5) マイクロ스코ープを用いて観察することによりひび割れの検出能力と幅の読み取り精度が向上し、繊維の引抜け状況を観察することができた。

DF によって被覆した鋼管は、棒部材あるいは面部材として利用することを想定している。すなわち、衝撃荷重や大きな地震力を受けて鋼材の降

伏程度まで部材が変形しても、除荷後は耐荷力を



(a) 見え始め時 (変位 2mm 程度) (b) 最大荷重時 (変位 20mm 程度)

写真-2 マイクロ스코ープによるひび割れ観察 (DF-2 供試体)

有しているだけでなく、コンクリートのひび割れ幅も残留変位も小さく補修をほとんど必要としない構造物を目指している。

実験および論文を作成するに当たり、岐阜大学学部生、畑朋宏氏に多大なる協力を得た。ここに記して感謝する。

### 参考文献

- 1) 本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(Ⅱ),2004.5
- 2) Li, V. C. : From micromechanics to structural engineering - the Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 10, No. 2, pp.37-48, 1993
- 3) 森川秀人,国枝稔,藤元安宏,六郷恵哲：ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料で鋼材を被覆した部材の力学挙動,コンクリート工学年次論文集, No.25 , Vol.1, pp.263-268, 2003