

# 論文 高強度鋼繊維補強材料で接合されたプレキャストコンクリートはりの曲げ挙動

吉武謙二\*1・田中博一\*2・栗田守朗\*3・塩屋俊幸\*4

要旨：曲げスパンに継手部を有するプレキャストRCはりを対象とし、継手部材料、重ね継手長などの継手部構成の違いを実験要因として曲げ実験を実施した。その結果、圧縮強度 $130\text{N/mm}^2$ の高強度鋼繊維補強モルタルを継手部に使用した場合は重ね継手長が $10d$ で、圧縮強度 $65\text{N/mm}^2$ の高強度鋼繊維補強コンクリートを使用した場合は重ね継手長が $15d$ で良好な継手性能が得られた。また、新たに考案した主鉄筋の重なっていない断面を有する継手でも、高強度鋼繊維補強モルタルを用いることにより、定着長 $10d$ で延性的な曲げ挙動を示した。付着割裂強度も鋼繊維を混入することにより向上した。

キーワード：継手、高強度鋼繊維補強材料、プレキャスト、曲げ挙動、付着割裂強度

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物のプレキャスト化は、品質、工期短縮の面で優れ、建設労働者の高齢化・熟練工不足の問題に対し、省力化・省人化を図る上で重要である。しかし、プレキャスト化は、部材間の継手の高コスト化などの要因により、普及していないのが現状である。

鉄筋の継手工法としては、重ね継手、ガス圧接継手、種々の機械式継手、溶接継手がある。ガス圧接継手、機械式継手、溶接継手は鉄筋を直接接合するため、特別な装置が必要であり高価である。一方、重ね継手は鉄筋とコンクリートとの付着によって接合する継手であり、施工性・経済性に優れているため、鉄筋継手に重ね継手を使用したいという要望が高まっている。しかし、重ね継手は被りコンクリートが剥落した場合に、脆性的な破壊を生じる可能性があるため、耐震性能に対する信頼性が乏しい。

重ね継手に関する研究は、普通コンクリートを継手部に用いたものが大半で、高強度コンクリートを対象とした研究は角陸<sup>1)</sup>、桜田<sup>2)</sup>らに見られる程度である。また、プレキャストコン

クリート床版の継手構造に関する研究は浜田<sup>3)</sup>らが行っているが、高強度繊維補強材料を使用した研究は国内では塩屋<sup>4)</sup>らのみである。

実験の対象は、曲げスパンに継手部を有する鉄筋コンクリートはりである。継手部に圧縮強度 $130\text{N/mm}^2$ 程度の鋼繊維補強高強度モルタルCRC<sup>5)</sup> (Compact Reinforced Composite)、および $65\text{N/mm}^2$ 程度のECL (Extruded Concrete Lining) 工法<sup>6)</sup> 用を開発した鋼繊維補強コンクリートSFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) を使用した。継手部材料、重ね継手長を実験要因として曲げ実験を実施した。また、新たに考案した主鉄筋の重なっていない断面を有する場合(以下、突き合わせ継手と称する。)の定着長、および添筋の有無も実験要因とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 材料および力学的特性

表-1に材料の配合とフレッシュ性状および現場で封緘養生した供試体の硬化性状を示す。表中のpre-NCはプレキャスト部の普通コンクリートを示している。CRCは、セメント、マイ

\*1 清水建設(株) 技術研究所 構造研究開発部 工修(正会員)  
 \*2 清水建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 工修(正会員)  
 \*3 清水建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 主任研究員 工修(正会員)  
 \*4 清水建設(株) 技術研究所 構造研究開発部 主任研究員 工博(正会員)

表-1 コンクリートの配合と性状

材料種類	W/B (%)	s/a (%)	鋼繊維混入率 (vol%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (mm)	スランプフロー(mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
				水	セメント	FA *1	細骨材	粗骨材	鋼繊維						
pre-NC	57	45.6	0	166	290	-	833	1012	0	134	-	29.5	4.6	2.4	32.4
SFRC-0	38	68.5	0	190	400	100	1111	507	0	-	680	65.2	5.7	3.4	33.2
SFRC-1	38	68.5	1	190	400	100	1085	507	78.5	-	655	67.5	8.3	5.9	34.3
CRC-0	16	-	0	150	940	-	1299	-	0	-	595	131.2	8.9	7.0	42.6
CRC-3	16	-	3	150	940	-	1221	-	235.5	-	530	128.0	13.7	10.4	45.9
CRC-6	16	-	6	150	940	-	1142	-	471.0	-	410	131.2	16.0	12.5	44.9

\*1: FA はフライアッシュの略称

表-2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏歪み (μ)
D10	390.2	535.0	179.0	2192.0
D13	389.4	561.7	181.0	2175.0

クロシリカ、およびナフタレン系の高性能減水剤をプレミックスしたDSPセメントを用い、直線型（直径0.4mmで長さ12mm）で引張強度が1350N/mm<sup>2</sup>の鋼繊維を使用した。SFRCの鋼繊維には、両端フック付結束型（直径0.6mmで長さ30mm）で引張強度が1358N/mm<sup>2</sup>のものをを用いた。なお、pre-NCとSFRCの最大粗骨材寸法は20mmである。また、CRCの練り混ぜには、55lの強制2軸練りミキサを用いた。結合材と細骨材で1.5分、水を加えて8分、鋼繊維を加えて2.5分間練り混ぜを行った。以下、材料は材料の種類-鋼繊維混入率で表す。鉄筋はSD345を用いた。引張試験結果を表-2に示す。

## 2.2 試験体概要

試験体は2つのプレキャストRCはりを用い、重ね継手および突き合わせ継手により接合する場合を想定している。表-3に実験ケースを、図-1に代表的な試験体の形状および配筋を示す。継手部の材料、重ね継手長、また突き合わせ継手の場合の定着長、および添筋の有無を実験要因とした。

図-1(a)は、継手のない標準試験体である。引張鉄筋比は0.5%で、想定破壊モードは曲げ破壊である。図-1(b)は、突き合わせ継手で添筋を有する試験体である。施工性の向上を目的として、両側のプレキャストコンクリートから突出した主鉄筋の水平間隔を2dとした。また図-1(c)は、重ね継手長が10dの試験体である。主鉄

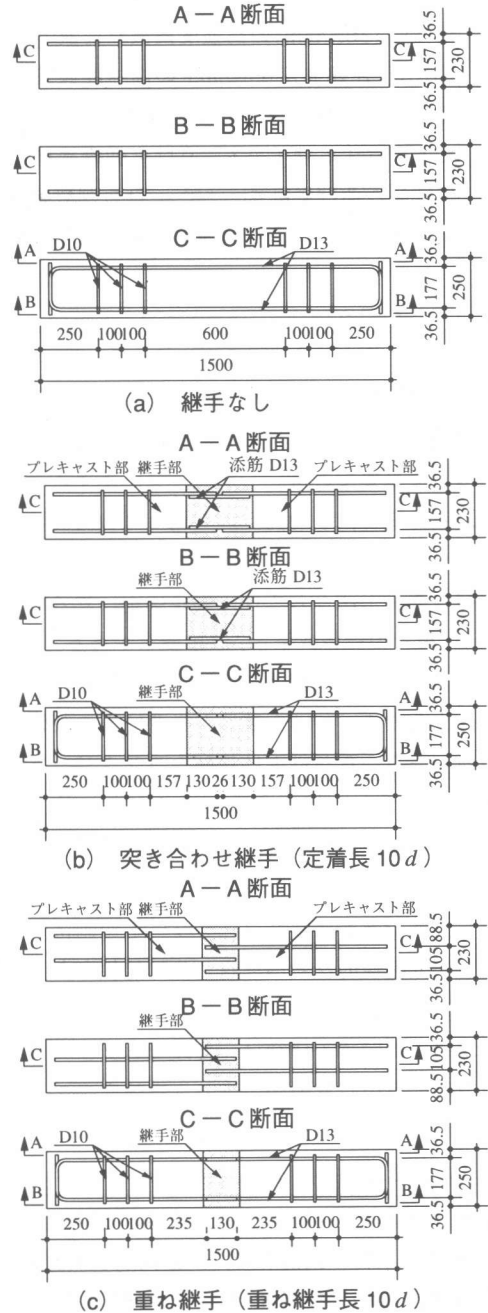


図-1 試験体形状および配筋

表-3 実験ケースと結果

試験体番号	重ね継手長	定着長	継手部材料	添筋	最大荷重 (kN)	曲げひび割れ発生荷重	破壊モード
No.1	継手なし	—	NC	無し	129.1	39	主鉄筋降伏、コンクリートの圧壊後の主鉄筋の破断
No.2	0d	5d	CRC-0	無し	44.9	30	曲げ引張破壊
No.3	0d	5d	CRC-3	無し	108.4	33	主鉄筋降伏後、曲げ引張破壊
No.4	0d	5d	CRC-6	無し	91.6	31	主鉄筋の引抜け
No.5	0d	5d	CRC-0	有り	48.1	32	曲げ引張破壊
No.6	0d	5d	CRC-3	有り	122.6	30	主鉄筋降伏後、付着割裂破壊
No.7	0d	10d	CRC-0	無し	73.8	24	曲げ引張破壊
No.8	0d	10d	CRC-3	無し	139.6	31	主鉄筋降伏後、曲げ引張破壊
No.9	0d	10d	CRC-6	無し	141.6	35	主鉄筋降伏、コンクリートの圧壊後の主鉄筋の破断
No.10	0d	10d	CRC-0	有り	80.1	21	曲げ引張破壊
No.11	0d	10d	CRC-3	有り	143.6	30	主鉄筋降伏、コンクリートの圧壊後の主鉄筋の破断
No.12	5d	—	CRC-0	無し	65.0	35	付着割裂破壊
No.13	5d	—	CRC-3	無し	117.4	31	主鉄筋降伏後、付着割裂破壊
No.14	5d	—	CRC-6	無し	129.0	36	主鉄筋降伏後、付着割裂破壊
No.15	5d	—	SFRC-0	無し	67.9	35	付着割裂破壊
No.16	5d	—	SFRC-1	無し	85.5	33	付着割裂破壊
No.17	10d	—	CRC-0	無し	104.4	30	主鉄筋降伏後、付着割裂破壊
No.18	10d	—	CRC-3	無し	130.3	35	主鉄筋降伏、コンクリートの圧壊後の主鉄筋の引抜け
No.19	10d	—	CRC-6	無し	130.5	35	主鉄筋降伏、コンクリートの圧壊後、装置の制約により終了
No.20	10d	—	SFRC-0	無し	95.4	26	付着割裂破壊
No.21	10d	—	SFRC-1	無し	120.0	35	主鉄筋降伏後、付着割裂破壊
No.22	15d	—	SFRC-0	無し	127.0	24	主鉄筋降伏後、剥離破壊
No.23	15d	—	SFRC-1	無し	131.6	31	主鉄筋降伏、コンクリートの圧壊後の主鉄筋の引抜け

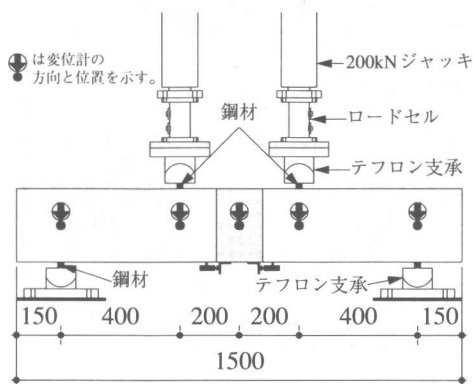


図-2 荷重装置および測定項目

筋とプレキャストコンクリートの水平間隔は  $1d$  とした。従来の重ね継手と異なり、両側のプレキャスト部から突出した主鉄筋は継手部において結束されていない。試験体は、プレキャスト部のコンクリートを先行して打設した。継手面の型枠にコンクリート打継目処理剤を塗布し、型枠脱型後、ワイヤーブラシにより目荒らしを行った。コンクリートは荷重方向と垂直に打設した。試験体は材令7日まで湿布養生し、その後は気中養生とした。

### 2.3 荷重および測定方法

図-2 に荷重装置および測定項目を示す。試験体はテフロン支承により支持し、2つのジャッキの反力が等しくなるように単調荷重を

実施した。荷重は  $22\text{mm} \times 22\text{mm}$  の鋼材を介して行った。鋼材と試験体間は、石膏を用いて不陸を低減した。荷重は継手部材料の材令4週以降に実施した。

試験体中央、荷重点、支承部で鉛直変位を測定した。また、接合面でのひび割れ幅、接合面のプレキャスト部側と試験体中央での主鉄筋のひずみ、試験体中央上部でのコンクリートのひずみも測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊モード

表-3 に示すように破壊モードは曲げ引張破壊、付着割裂破壊、曲げ破壊の3種類であった。ここで、付着割裂破壊とは底面および側面の被りコンクリートが割り裂ける破壊と定義する。実験終了時における代表的な最終破壊状況を図-3 に示す。図中の太線のひび割れは、実験時のひび割れ幅が大きかったものを示している。

継手のない試験体 No.1 は、主鉄筋降伏後、コンクリートが圧壊し最大耐力に達し、鉛直変位が約  $40\text{mm}$  で主鉄筋が破断した。試験体 No.8 は主鉄筋降伏後、主鉄筋のない試験体中央からの曲げひび割れによって試験体が2つに分断され破壊に至った。ひび割れ面では鋼繊維がコンク

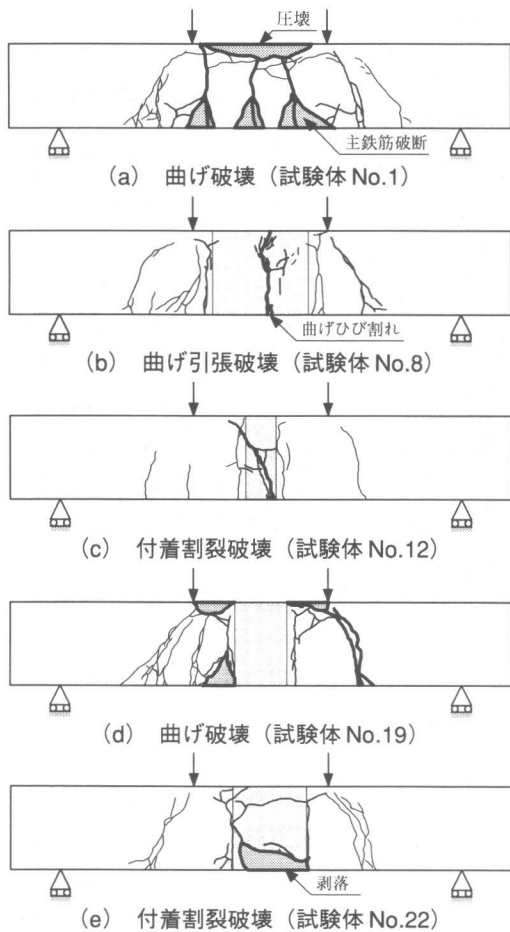


図-3 最終破壊状況

リートから引き抜いていた。試験体No.12では、試験体底面のコンクリートが割裂し破壊に至った。また、試験体No.22では主鉄筋降伏後、主鉄筋の底面および側面の被りコンクリートが剥落し脆性的に破壊した。

また、試験体No.9, 10, 11, 13, 16, 20, 22では、接合面に沿ったひび割れが生じたが、最大耐力に至る要因とはならなかった。その他の試験体では、ひび割れは接合面から1cm程度離れたプレキャスト部に発生し、接合面での剥離は見られなかった。

### 3.2 荷重-変位関係

図-4に荷重-変位関係を示す。荷重は2つのジャッキ反力の合計で、変位は試験体中央と支承部の鉛直相対変位である。曲げ引張破壊や付着割裂破壊により最大耐力に至った試験体は、

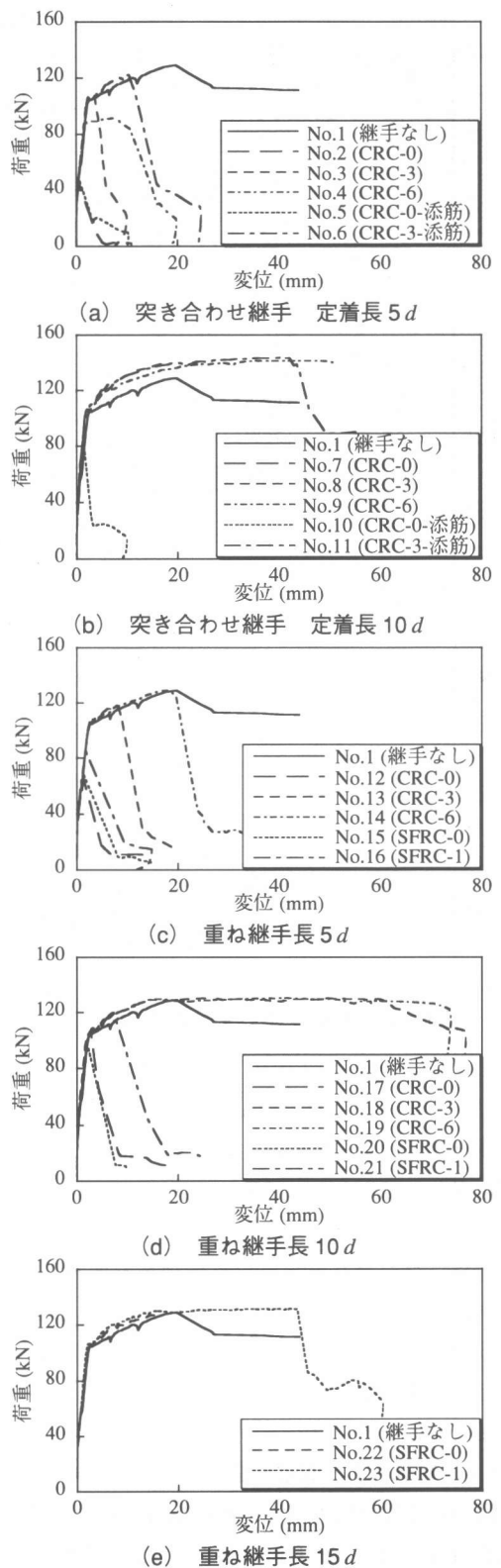


図-4 荷重-変位関係

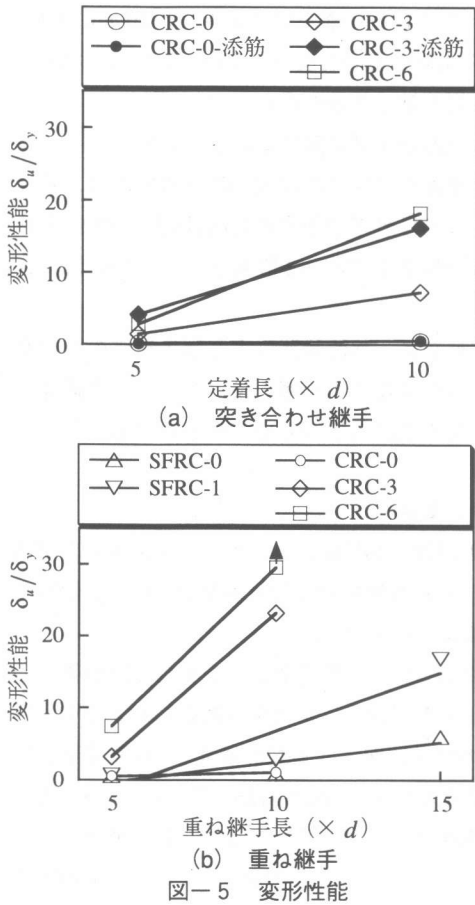


図-5 変形性能

脆性的に破壊し荷重が急激に低下している。

突き合わせ継手で定着長が10dの場合、CRC-6を用いた試験体No.9とCRC-3を用いて添筋を有する試験体No.11では部材降伏後も延性的な曲げ挙動を示す良好な継手性能が得られた。また、重ね継手長10dでCRC-3とCRC-6を用いた試験体No.18とNo.19、重ね継手長15dでSFRC-1を用いた試験体No.23で良好な継手性能が得られた。これらの良好な継手性能を有する試験体は継手のない試験体No.1より最大耐力が増大した。前述のように、継手のない試験体はコンクリートの圧縮破壊により最大耐力に至った。一方、継手部を有する試験体は曲げスパン部に高強度材料を使用しているため、圧縮側の被りコンクリートが剥離するような圧縮破壊を生じなかったため荷重が低下しなかったと考えられる。

また、試験体中央の主鉄筋は継手のない試験体No.1と主鉄筋の引抜けた試験体No.23のみで降伏に達した。それ以外の降伏耐力以上の性能を有する試験体では接合面のプレキャスト側の主鉄筋で降伏が確認された。

図-5に定着長および重ね継手長と変形性能の関係を示す。縦軸は荷重が急激に低下した時の変位 $\delta_u$ を継手のない試験体No.1の主鉄筋降伏時の変位 $\delta_y=2.5\text{mm}$ で除した値である。

定着長および重ね継手長が等しい場合、コンクリート強度、鋼繊維混入率が高くなるにつれて変形性能が向上している。また、定着長が10dで鋼繊維の混入されていないCRC-0では、添筋の有無が変形性能に及ぼす影響は少ないが、CRC-3では脆性的な曲げ引張破壊が回避されており、鋼繊維の混入により添筋の効果が増大している。

### 3.3 付着割裂強度

重ね継手の付着割裂破壊は主鉄筋の降伏に関係なく生じるが、主鉄筋降伏後は部材の荷重はあまり増大せず、変形のみが増大するので強度評価としてそのデータを使用できない。そこで、主鉄筋降伏以前に付着割裂破壊をした試験体No.12, 15, 16, 20を用いて付着割裂強度を評価する。ここでは、継手強度の評価として最大荷重時の平均付着応力 $\tau_u$ を用いることとし、式(1)により算定した。

$$\tau_u = \frac{M_u}{\phi \cdot l_s \cdot (\frac{7}{8}) \cdot d_e} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

ここで、 $M_u$ :最大曲げモーメント、 $\phi$ :主鉄筋周長、 $l_s$ :重ね継手長、 $d_e$ :有効高さ

また、式(2)に示す角陸式<sup>1)</sup>により重ね継手の付着割裂強度を算定する。

$$\tau_{kado} = 0.197(2.7 + 0.5b_l + 25\frac{d}{l_s})\sigma_p^{0.3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

$b_l$ は、 $b_{vi}$ ,  $b_{ci}$ ,  $b_{si}$ の最小値

$$b_{vi} = \sqrt{3} \left( \frac{2C_{\min}}{d} + 1 \right) \quad (3)$$

表-4 付着割裂強度

試験体番号	重ね継手長	継手部材料	最大平均付着応力(N/mm <sup>2</sup> )	付着割裂強度(角陸)(N/mm <sup>2</sup> )
No.12	5d	CRC-0	13.0	9.5
No.15	5d	SFRC-0	13.6	7.7
No.16	5d	SFRC-1	17.1	7.8
No.20	10d	SFRC-0	9.5	5.9

$$b_{ci} = \sqrt{2} \left( \frac{C_s + C_b}{d} + 1 \right) - 1 \quad (4)$$

$$b_{si} = \frac{b}{Nd} - 2 \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_b$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $C_s$ ：側面被り厚さ、 $C_b$ ：底面被り厚さ、 $C_{min}$ ：最小被り厚さ ( $C_s$ と $C_b$ の小さい方)、 $N$ ：継手筋組数、 $d$ ：主鉄筋径。

表-4に平均付着応力度、および角陸式による付着割裂強度を示す。試験体No.12, 15, 20の最大平均付着応力は、角陸式による付着割裂強度の約1.4倍以上、鋼繊維が混入されている試験体No.16では約2.2倍大きいことが確認できる。これら結果より、本試験の継手材料は付着割裂破壊に対して良好な性能を有していると考えられる。

実験では横補強筋を用いなかったが、横補強筋を用いることにより、付着割裂強度が向上することが知られている<sup>7)</sup>。よって、今回の実験で付着割裂により破壊に至った試験体においても、横補強筋を配置することにより十分な継手性能が得られる可能性があると考えられる。

#### 4. 結論

曲げスパンに高強度鋼繊維補強材料を使用した継手部を有するはり試験体について、継手部材料、重ね継手長、突き合わせ継手を用いた場合の定着長、添筋の有無などの継手部構成の違いが曲げ挙動に及ぼす影響を把握することを目的として曲げ実験を実施した。本実験で得られた知見を以下に示す。

(1) 継手部にCRC-3を用いた場合は重ね継手長が10d、SFRC-1を用いた場合は重ね継手長が15dで良好な継手性能が得られた。

(2) 突き合わせ継手では定着長が10dで、CRC-3に添筋を用いた場合とCRC-6を用いた場合に良好な継手性能が得られた。

(3) 重ね継手部に鋼繊維の混入されていない材料を使用した場合の最大平均付着応力は、角陸式による付着割裂強度の1.4倍以上、鋼繊維を使用した場合では約2.2倍大きいことが確認できた。

本研究は、静的載荷により継手構成の違いが曲げ挙動に及ぼす影響を検討したが、今後繰返し荷重を受ける場合の研究が必要である。

#### 参考文献

- 1) 角陸純一：高強度コンクリート部材中の重ね継手の力学性状に関する研究，神戸大学博士論文，1995.3
- 2) 桜田智之，師橋憲貴，田中礼治：重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋および中子筋の効果に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，pp119-128，第465号，1994.11
- 3) 浜田純夫，阿部宗人，石川 哲：種々のプレキャスト床版継手の静的挙動およびその実用性に関する研究，土木学会論文集，No. 553/VI-33，pp.103-116，1996.12
- 4) 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
- 5) 栗田守朗，塩屋俊幸，林 秀彦，吉武謙二：鋼繊維補強高強度モルタルの諸性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp.307-312，2000
- 6) 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.52-58，1996.12
- 7) 矢代秀雄，桜田智之，町田修一：重ね継手部分のあばら筋の効果に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1355-1356，1973.