

V-39

主鉄筋比およびせん断スパン比を変化させた

FRP シート補強 RC 梁の曲げ耐荷性状

室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩
 室蘭工業大学 フェロー 松 岡 健 一
 室蘭工業大学 ○学生員 栗 橋 祐 介

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐震性能の向上や老朽化対策を目的とした補修・補強工事が盛んに行われている。これらの補修・補強工事には、鋼板の他に連続繊維強化プラスチック (FRP) シートを用いた接着工法も多く採用されているようである。また、各研究機関において FRP シート補強工法に関する研究が活発に行われている。著者らはこれまで RC 梁を FRP シートで曲げ補強する場合に着目し、FRP シートの曲げ補強効果に関して実験的に検討を行ってきた^{1)~3)}。その結果、FRP シート補強による RC 梁の耐力向上効果やシートの曲げ付着性状を大略把握することができた。

本研究では、さらに種々の RC 梁に接着した FRP シートの曲げ補強効果に関する詳細な検討を行うため、主鉄筋比およびせん断スパン比を変化させた FRP シート曲げ補強 RC 梁の静的曲げ載荷実験を行った。主な検討項目は FRP シート補強による曲げ耐力の向上効果、シート剝離時における梁中央部断面の曲率およびシートの歪分布性状である。なお、本実験では高い弾性伸び率を有し、非通電性、非磁性を特長とするアラミド FRP (以下、AFRP) シートを曲げ補強材として採用している。

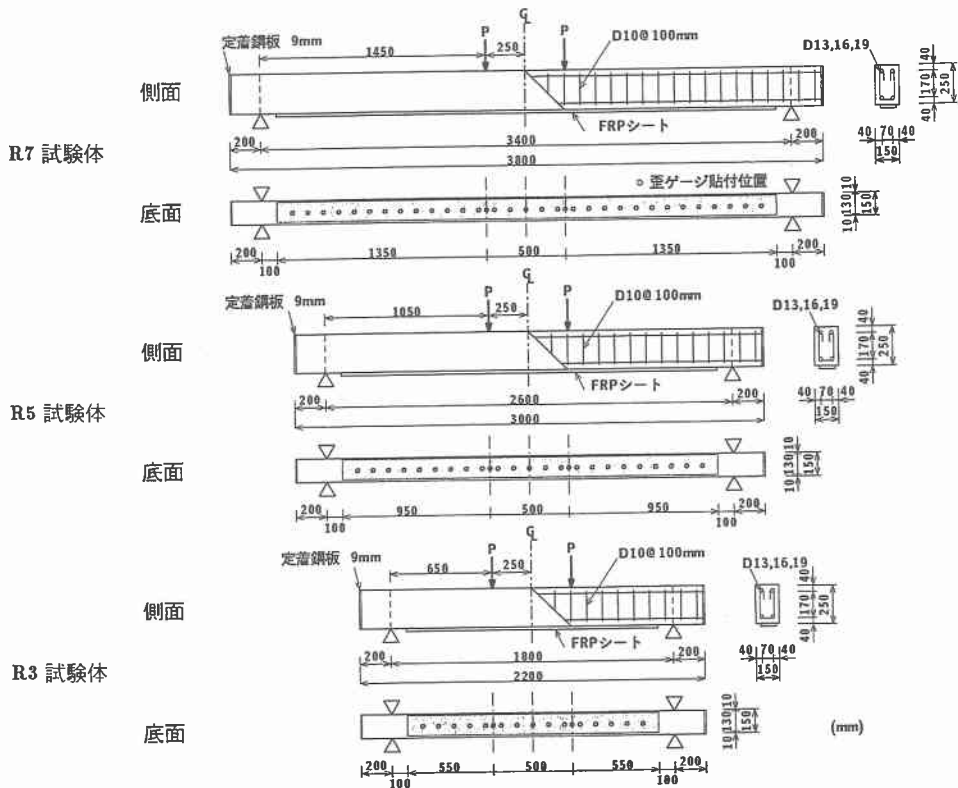
2. 実験の概要

表-1 に本実験に用いた試験体の一覧を示す。試験体数はせん断スパン比および主鉄筋径をそれぞれ3種類に変化させた全9体である。表中、試験体名のうち第1項はせん断スパン比の概略値、第2項は用いた主鉄筋の種類を表している。また、表中には設計時におけるせん断余裕度 (= せん断耐力/曲げ耐力) を併記している。図-1 に試験体の概要を示す。本実験に用いた試験体は断面寸法 25 × 15 cm の複鉄筋 RC 梁であり、主鉄筋には D13, D16 もしくは D19 (SD345) を用いている。また、スターラップには D10 (SD295A) を用い、10 cm 間隔で配筋している。実験は等曲げモーメント区間を 50 cm とした2点載荷で行い、RC 梁のせん断スパン比 a/d が 7, 5, 3 程度となるようにせん断スパン長を設定している。試験体の設計は AFRP シート補強後においてもせん断耐力が曲げ耐力を十分に上回るように行った。なお、本試験体の設計において曲げ耐力は後述の断面分割法を用いて算出し、せん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書に準じて算出している。実験時のコンクリートは材齢が 45 ~ 57 日であり、平均圧

表-1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン比 a/d	主鉄筋	せん断 余裕度
R7-D13	6.9	D13	5.11
R7-D16		D16	4.31
R7-D19		D19	3.55
R5-D13	5.0	D13	3.70
R5-D16		D16	3.12
R5-D19		D19	2.57
R3-D13	3.1	D13	2.29
R3-D16		D16	1.93
R3-D19		D19	1.59

Effects of Shear Span and Main Rebar Ratio on Bending Capacity of RC Beams Strengthened with FRP Sheet
 by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi MATSUOKA and Yusuke KURIHASHI



図ー１ 試験体の概要

縮強度 $f'_c = 28.2 \text{ MPa}$, 弾性係数 $E_c = 23.4 \text{ GPa}$, ポアソン比 $\nu_c = 0.22$ である。

RC 梁の底面には幅 13 cm の AFRP シートを梁中央部から支点の 10 cm 手前までの範囲に貼り付けている。また、シート上にはゲージ長 10 mm の歪ゲージを 10 cm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。シート接着部のコンクリート表面には両者の付着特性を向上させるため、ショットブラスト処理を施すこととした。また、ショットブラスト処理を施した場合、コンクリート表面における下地用プライマーの吸収性が高いため、プライマー塗布工を二回実施した。表ー２、３には引張試験により得られた鉄筋の降伏強度および AFRP シートの公称の力学的特性を示している。測定項目は載荷荷重、スパン中央部における変位および上側鉄筋歪、AFRP シート各点の発生歪である。なお、本実験ではシート剥離時のひび割れ性状を検討するためシートの剥離と同時に載荷を中止している。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

図ー２には全試験体に関する荷重－変位関係を示している。なお、無補強時における荷重－変位関係には、

表ー２ 鉄筋の降伏強度 (単位: MPa)

鉄筋	D10	D13	D16	D19
降伏強度	392.0	382.4	378.2	380.0

表ー３ AFRP シートの力学的特性

目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
415	0.286	126.51	2.48	1.96

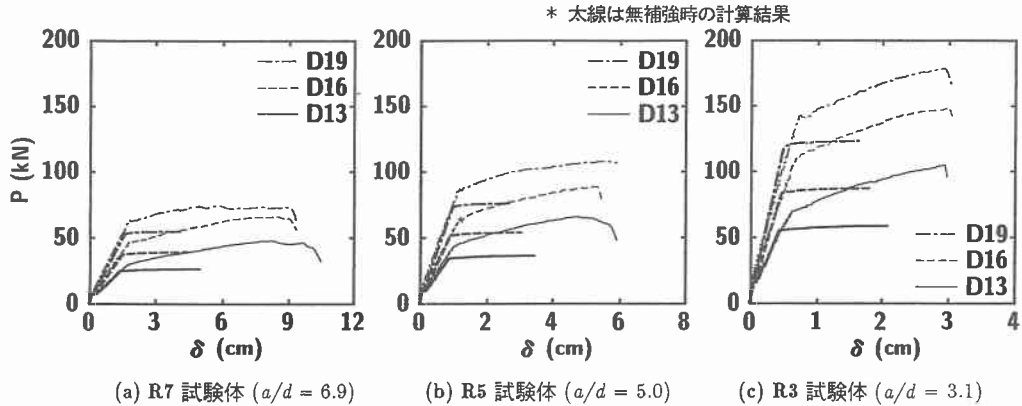


図-2 荷重-変位関係

前述のコンクリートの平均圧縮強度 f'_c および主鉄筋の降伏強度を用いた断面分割法による計算結果を代用している。計算ではコンクリートの終局圧縮歪 ϵ'_{cu} を $3,500 \mu$ と仮定し、梁上縁のコンクリート歪が ϵ'_{cu} に至るまで演算を行っている。

AFRP シート補強した試験体の荷重は無補強の場合と異なり、主鉄筋降伏後も著るに増加している。その後、全試験体において最大荷重時近傍でシートの剝離を生じ、荷重は急激に低下している。図より、各 a/d において主鉄筋の降伏荷重は主鉄筋径の増大とともに大きく示され、それ以降の荷重の増加勾配は主鉄筋径にかかわらずほぼ同等なものとなっていることがわかる。従って、各 a/d において FRP シート補強による曲げ耐力の増加量は梁の主鉄筋径にかかわらずほぼ同程度であると考えられる。

なお、R7-D19 試験体は R7-D13, 16 試験体に比して小さな変位レベルで荷重が若干低下しており、曲げ耐力の増加量が少ない。これは後述のひび割れ分布で示しているように、R7-D19 試験体の上縁コンクリートの損傷が他に比べて小さな変位レベルで進展したためと考えられる。

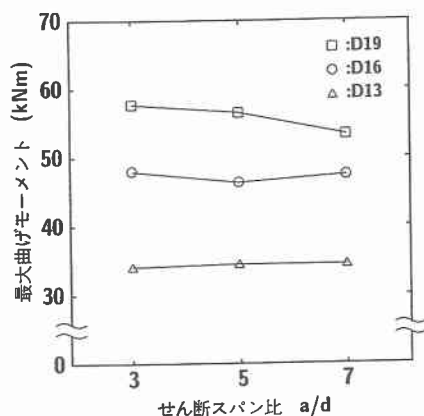
表-4 に実験および計算結果の一覧を示す。表中の計算最大荷重は前述の無補強の場合と同様に断面分割法によって算出したものである。なお、計算はコンクリートと FRP シートの完全付着を仮定して行っている。表より、全試験体における実測最大荷重は計算最大荷重を上回っていることがわかる。計算最大荷重は上縁コンクリート圧壊時のものであることから、実測最大荷重時における梁上縁コンクリートの歪は ϵ'_{cu} に達しているもの推察される。このことは本実験におけるシートの剝離が、最終的に梁上縁コンクリートの圧壊に伴う曲率の増加に起因して生じていることを示唆している。

3.2 最大曲げモーメントおよび最大曲率

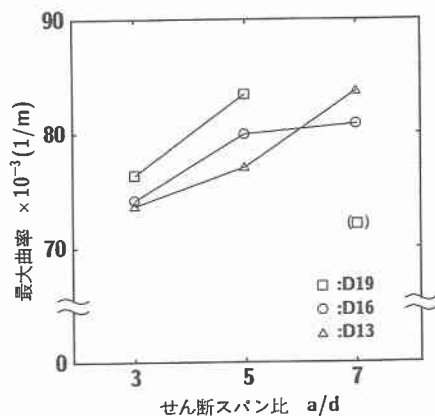
図-3 に最大曲げモーメントおよび最大曲率とせん断スパン比 a/d との関係を示す。ここで、最大曲げモーメントは表-4 で示した最大荷重と各試験体のせん断スパン長から算出している。また、最大曲率はスパン中央部の上側鉄筋歪および等曲げモーメント区間におけるシート歪の平均値（以下、平均歪）より算出したものである。

表-4 実験および計算結果の一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重 時変位 (cm)	計算最大 荷重 (kN)
R7-D13	47.5	8.19	46.8
R7-D16	65.4	8.48	57.3
R7-D19	73.5	5.88	71.5
R5-D13	65.6	4.73	64.7
R5-D16	88.2	5.32	79.1
R5-D19	107.6	5.58	98.7
R3-D13	104.5	2.93	104.4
R3-D16	147.5	2.97	127.8
R3-D19	177.5	2.93	159.4



(a) 最大曲げモーメント



(b) 最大曲率

図-3 最大曲げモーメントおよび最大曲率とせん断スパン比との関係

(a)図より、主鉄筋径が同様であれば a/d にかかわらず最大曲げモーメントはほぼ同程度であることがわかる。また、主鉄筋径が大きくなると最大曲げモーメントも大きくなっていることがわかる。一方、(b)図より最大曲率は $a/d = 3.1$ の R3 試験体の場合で若干小さいものの、 a/d や主鉄筋径にかかわらず大略 $80 \times 10^{-3} (1/m)$ 程度となっていることがわかる。なお、R7-D19 試験体において最大曲率が小さく示されているが、これは図-2の荷重-変位関係で示したように、同試験体では他の試験体に比して FRP シートの曲げ補強効果が十分に得られていないためと考えられる。

3.3 破壊性状

図-4に実験終了後における全試験体の破壊性状を示す。図より、ひび割れ性状およびその分布範囲は a/d や主鉄筋径にかかわらずほぼ同様であり、等曲げモーメント区間では曲げひび割れ、せん断区間には曲げせん断ひび割れが発生していることがわかる。また、梁下縁のかぶりコンクリートには多数のひび割れが生じ、等曲げモーメント区間ではかぶりコンクリートが完全に剝落している。実験時には載荷点近傍のかぶりコンクリートに発生した斜めひび割れが梁のたわみ量の増加とともに開口し、この部分にせん断ずれが生じている。また、終局時にはこのせん断ずれが起因となって、FRP シートの引き剥がれ(ピーリング現象)が発生・進展し、

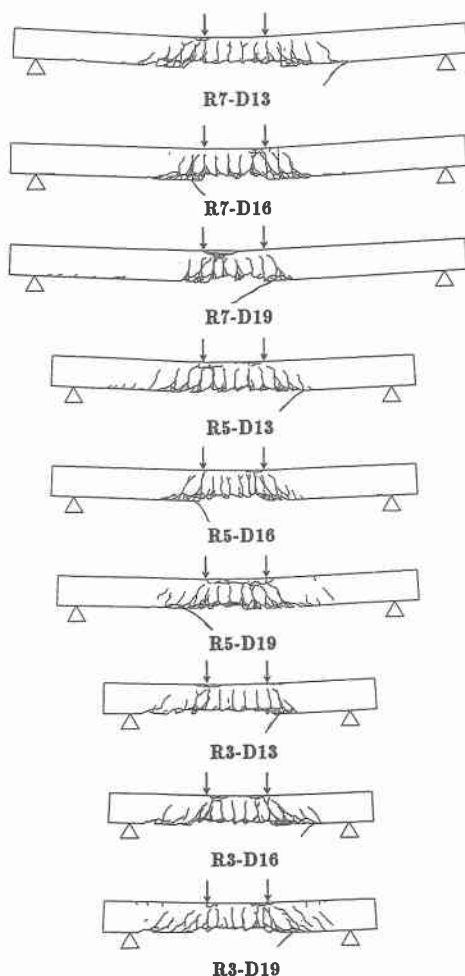


図-4 破壊性状

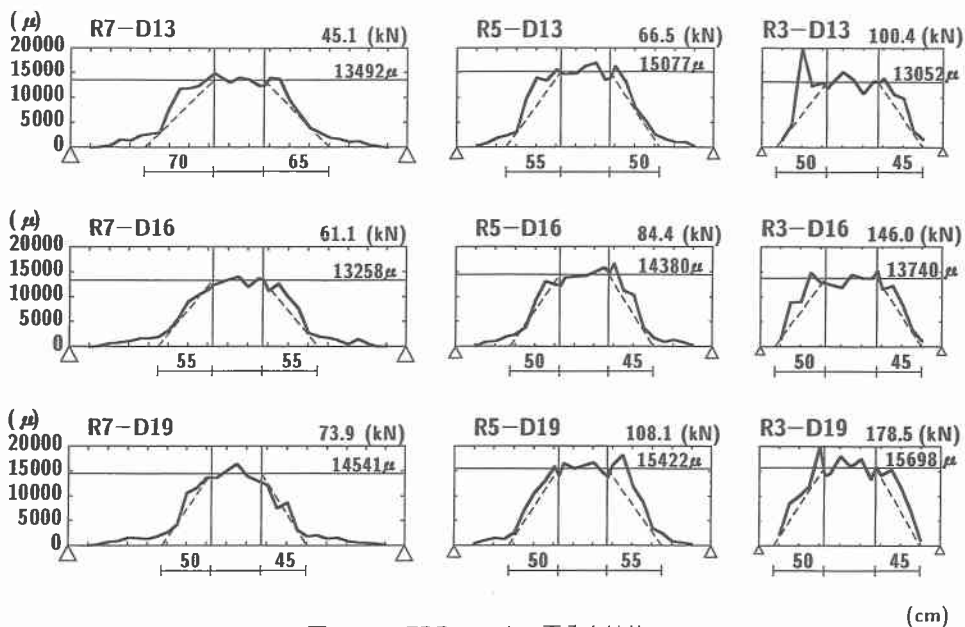


図-5 AFRP シートの歪分布性状

シートの完全剥離に至っている。写真-1には最大荷重時近傍において発生したピーリング現象の一例を示している。

3.3 AFRP シートの曲げ付着特性

図-5に AFRP シートの歪分布性状を示す。ここでは、最大荷重時近傍において前述のピーリング現象により AFRP シート歪が等曲げモーメント区間における値と同程度に達する領域が、支点側に急激に進行する直前の歪分布を示している。図中には等曲げモーメント区間に発生する平均歪が支点側に向かって線形に減少すると仮定した場合における零歪位置までの距離（以下、付着抵抗長さ）の概略値を示している。

図より、R7-D13 試験体の場合を除き、 a/d や主鉄筋径にかかわらずほぼ同様の付着抵抗長さとなっていることがわかる。R7-D13 試験体の場合には、後述のように主鉄筋の降伏領域が他の試験体に比して支点方向に拡大していることより、付着抵抗長さが長くなったものと考えられる。また、R3 試験体はせん断スパン長が短く AFRP シートの貼り付け範囲も短いため、歪の分布範囲が載荷点からシートの接着端部近傍にまで及んでいる。このことは、図-3(b)に示したように、R3 試験体は他の試験体に比して小さな曲率でシート剥離を生じた要因であると考えられる。

表-5には図-5より得られる AFRP シートの曲げ付着特性の一覧を示している。表中、平均付着抵抗長さは試験体左右の付着抵抗長さを平均したものであり、単位幅当たりの平均引張力は平均歪に AFRP シートの弾性係数およびシート厚を乗じて算出したものである。また、平均付着強度は単位幅当たりの平均引張力を平均付着抵抗長さで除したものである。また、表には参考のため断面分割法に基づいて算出した計算

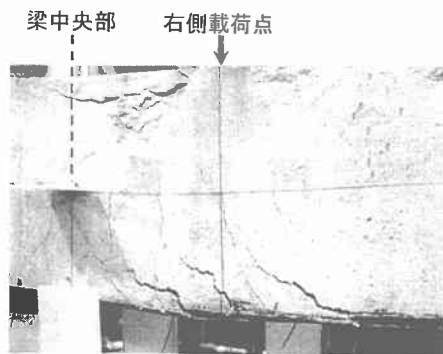


写真-1 ピーリング現象

表-5 AFRP シートの曲げ付着特性

試験体名	主筋降伏範囲 (cm)	平均付着抵抗長さ (cm)	平均歪 (μ)	単位幅当たりの 平均引張力 (kN/cm)	平均付着強度 (MPa)
R7-D13	60.0	67.5	13,492	4.88	0.72
R7-D16	47.0	55.0	13,256	4.79	0.87
R7-D19	37.0	47.5	14,541	5.26	1.11
R5-D13	44.0	52.5	15,077	5.45	1.04
R5-D16	34.0	47.5	14,380	5.20	1.10
R5-D19	27.0	52.5	15,422	5.58	1.06
R3-D13	27.0	47.5	13,052	4.72	0.99
R3-D16	21.0	47.5	13,740	4.97	1.05
R3-D19	17.0	47.5	15,698	5.68	1.14

最大荷重時における主鉄筋の降伏範囲 (以下、主筋降伏範囲) もあわせて示している。

表より、主筋降伏範囲は R7-D13 の場合で 60 cm であるのに対し、他の場合では 47 cm 以下となることがわかる。従って、R7-D13 試験体の場合には主筋降伏範囲が他の試験体に比して広いため、図-5 においてシートの歪分布が広く示され、付着抵抗長さも長くなったものと考えられる。また、他の試験体の主筋降伏範囲は 17.0 ~ 47.0 cm と a/d や主鉄筋径によって様々であるが、平均付着抵抗長さは a/d や主鉄筋径にかかわらず 47.5 ~ 55.0 cm となっている。一方、平均付着強度は R7-D13 試験体の場合に小さい値を示しているものの、他の場合ではほぼ 0.9 ~ 1.1 MPa 程度となっている。

これらのことから、圧縮破壊を伴ってシートが剥離する場合、主筋降伏範囲が広い場合を除いて、平均付着抵抗長さおよび平均付着強度は a/d や主鉄筋径にかかわらずほぼ同程度であると考えられる。

4. まとめ

AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の合理的な補強設計手法を確立するため、せん断スパン比 a/d および主鉄筋径を変化させた AFRP シート曲げ補強 RC 梁の曲げ載荷実験を行った。本実験により得られた結果は以下の通りである。

- (1) 全ての試験体で曲げ圧縮破壊を伴ってシートが剥離し、実測の最大荷重は計算最大荷重を上回った。
- (2) 主鉄筋径が同様であれば最大曲げモーメントは a/d にかかわらずほぼ同等となる。
- (3) 最大曲率は $a/d = 3.1$ の場合で若干小さくなるが、全試験体において大略 80×10^{-3} (1/m) 程度となった。
- (4) 主筋降伏範囲の広い場合を除いて、平均付着抵抗長さおよび平均付着強度は a/d や主鉄筋径にかかわらず同等であり、それぞれ 47.5 ~ 55.0 cm および 0.9 ~ 1.1 MPa 程度であった。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1399-1410, 1999.
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートを接着した RC 梁の耐荷性状に与える接着範囲の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1549-1554, 1999.
- 3) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一: RC 梁における載荷点間隔が FRP シートの曲げ付着性状に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1555-1560, 1999.