

論文 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

栗橋祐介^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・松岡健一^{*2}

要旨：合理的な RC 部材の FRP シート曲げ補強法を確立することを目的として、静載荷時の載荷点間隔が FRP シートの曲げ付着性状に与える影響について実験的に検討を行った。本研究結果より、1) 一点載荷試験体はアーチ状ひび割れ位置におけるピーリング（シートの引き剥がれ）現象が発生しやすい、2) 二点載荷試験体は載荷点間隔やシートの材料特性に関わらず平均付着抵抗長さおよび平均付着強度はほぼ同等である、3) 一点載荷試験体ではピーリング現象によるシート剥離のため平均付着強度は小さく評価される、などが明らかとなった。

キーワード：RC 梁, FRP シート, 載荷点間隔, ピーリング現象, 平均付着強度

1. はじめに

近年、道路・鉄道橋脚などの既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐震補強工事が盛んに行われている。著者らはこれまで FRP シートを用いた補強工法に着目し、FRP シート巻き付けによるせん断補強効果および靱性向上効果に関する実験的検討を行い、その補強効果を確認している。

一方、FRP シートによる耐震補強をより効果的に行うために、せん断および靱性補強とともにシートを縦貼りして曲げ補強する工法も考えられ、一部で実用化されている。しかしながら、FRP シートの曲げ付着性状に関する研究報告は比較的少なく、未だ合理的な補強設計法が確立されていないのが現状である。特にシートの曲げ付着性状は、コンクリートとシートの相対変位差、主筋降伏による変位曲率の変化および斜めひび割れの発生に伴うせん断ずれに起因するピーリング（引き剥がれ）現象など多くの因子に影響されるため、それらを念頭に入れた検討・評価が重要となる。

本研究では RC 部材の FRP シートを用いた合理的な曲げ補強法を確立することを目的として、RC 梁の底面に FRP シートを接着した試験体を製作し、シートの材料特性および載荷点の間隔が FRP シートの曲げ付着性状や剥離挙動に与える影

響に着目して実験的に検討を行った。曲げ付着性状の検討は荷重—変位関係のほか、FRP シート上に 10cm 間隔で貼り付けた歪ゲージ出力による歪分布を基に行い、平均付着抵抗長さおよび平均付着強度に着目して検討を行った。

2. 実験の概要

表一に本研究に用いた試験体の一覧を示す。試験体は無補強を含め、載荷点間隔（以後、載荷幅）を 3 種類、FRP シートの材料種別を 2 種類に変化させた全 9 体である。試験体名は 1 項目に載荷幅、2 項目に FRP シートの材料種別（A；アラミド繊維 以下 AFRP, C；炭素繊維 以下 CFRP, N；無補強）を示している。なお、試験体はシートが剥離する要因となる斜めひび割れの発生を低減するためせん断余裕度を十分にとり、せん断スパン比 a/d を 5.5 として製作した。

図一に試験体の概要を示す。試験体は断面寸法を一定とし、せん断スパン比を 5.5 に設定しているため、各載荷幅ごとにスパン長を変化させている。本実験に用いたコンクリートは実験時材令：65 日、平均圧縮強度：23.93 MPa、弾性係数：21.95 GPa、ポアソン比 0.19 であった。主鉄筋は D13 (SD295)、スターラップには D6 (SD295)

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 建設工学専攻 工修（正会員）

*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博（正会員）

*3 三井建設（株）技術研究所 主任研究員 工博（正会員）

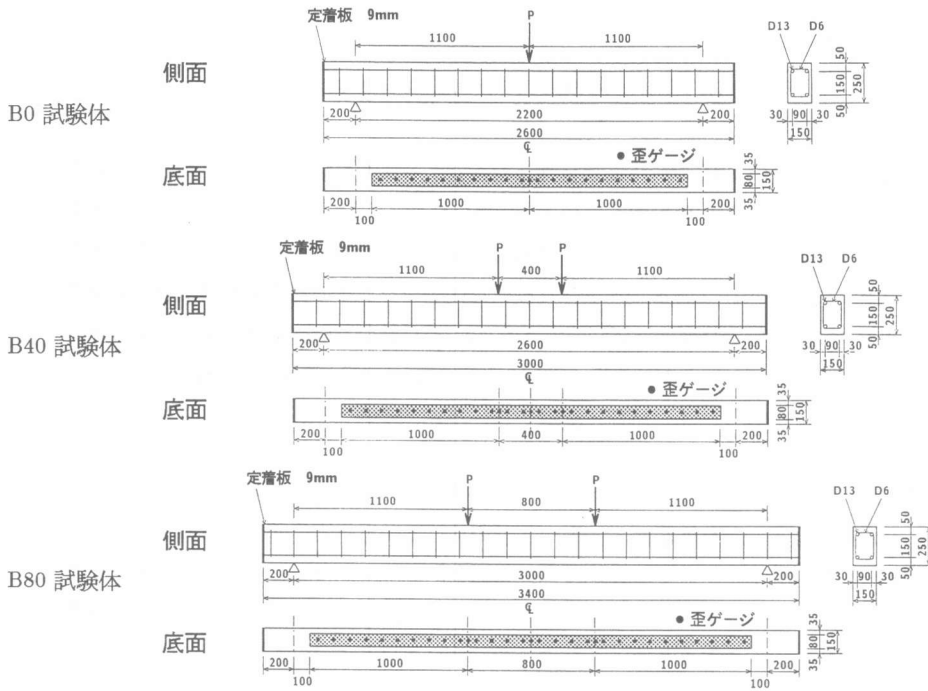


図-1 試験体の概要

(mm)

を用い15cm間隔に配筋している。鉄筋の降伏強度は引張試験結果より、D6は387.4MPa、D13は364.3MPaであった。補強した全試験体の底面には引張保証耐力が600kN/m程度のAFRPもしくはCFRPシートを梁中央部から両支点の10cm手前までの範囲に幅8cmで貼り付けている。なお、既往の研究¹⁾より、コンクリート表面とシートとの附着性能を向上させるためにはチップングによるコンクリート表面の深い異形化が最も効果的であることが明らかとなっている。これより、本研究では補強した全試験体の底面に深さ2.5mm程度のチップングを施している。

FRPシート上の歪ゲージは、シート両端部より5cmの位置から全範囲に渡って10cm間隔および中央点と載荷点位置に貼り付けることとした。測定項目は載荷荷重、スパン中央部変位およびシートの歪分布である。各センサーからの出力データはFRPシート剥離時の挙動を精度良く測定するため、データレコーダを用いて一括収録してい

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷点間隔 (cm)	補強材	目付量 (g/m ²)	せん断余裕度
B0-N	0	無補強	-	3.17
B0-A		AFRP	415	2.17
B0-C		CFRP	300	2.14
B40-N	40	無補強	-	3.17
B40-A		AFRP	415	2.17
B40-C		CFRP	300	2.14
B80-N	80	無補強	-	3.17
B80-A		AFRP	415	2.17
B80-C		CFRP	300	2.14

表-2 FRPシートの力学的特性

シートの種類	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
AFRP	0.286	126.51	2.48	1.96
CFRP	0.167	230.46	4.07	1.77

る。表-2に本実験に用いたFRPシートの力学的特性を示す。

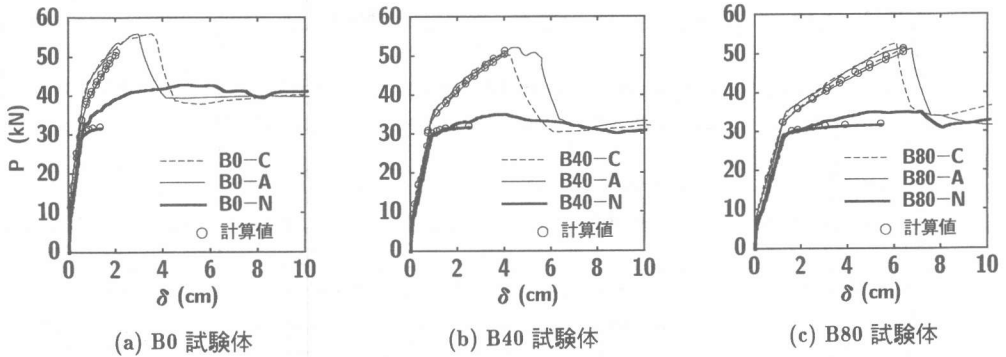


図-2 荷重-変位関係

表-3 実験結果の一覧

試験体名	主筋降伏点荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (cm)	破壊形式
B0-N	32.9	42.9	4.99	主筋降伏後圧壊
B0-A	42.6	56.1	2.94	剝離破壊
B0-C	43.6	55.1	3.49	剝離破壊
B40-N	30.2	35.1	3.96	主筋降伏後圧壊
B40-A	36.3	52.3	4.39	剝離破壊
B40-C	34.9	49.9	4.23	シート破断
B80-N	29.0	35.2	7.11	主筋降伏後圧壊
B80-A	35.3	52.4	6.39	シート破断
B80-C	35.1	52.5	6.10	シート破断

3. 実験結果

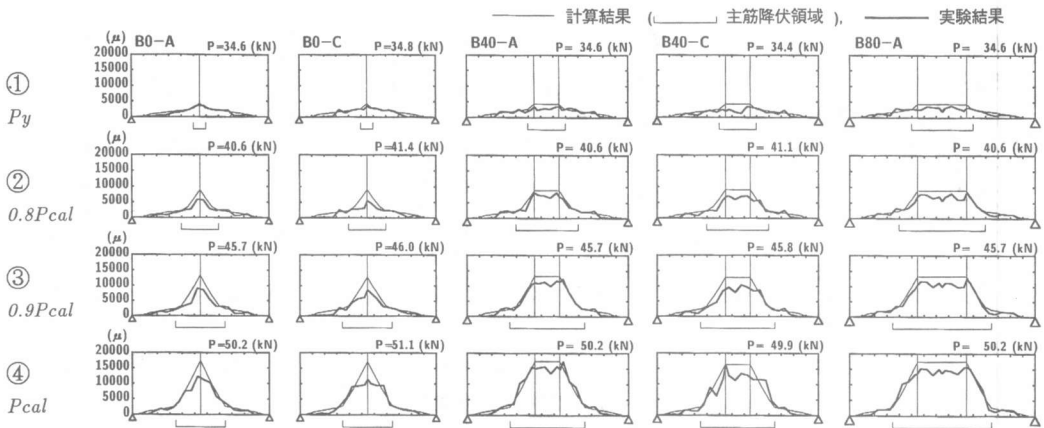
3.1 荷重-変位関係

図-2には各載荷幅ごとの荷重-変位関係の実験結果および計算結果を示している。各試験体はFRPシートで曲げ補強することにより、載荷幅に関わらず主筋降伏点荷重の上昇とともに、主筋降伏後の荷重も顕著に増加している。載荷荷重は最大値近傍においてFRPシートの剝離もしくは破断により急激に低下し、無補強の荷重レベルに至っている。実験結果と計算結果を比較すると、B0-N試験体の場合には若干対応していないものの、補強した試験体の場合には計算最大荷重時まで比較的精度良く対応していることから、主筋降伏後もコンクリートとFRPシートの付着は良好であったものと考えられる。なお、計算の荷重-変位関係は、前述のコンクリート、主鉄筋およびシートの力学的特性を用い、土木学会コンクリー

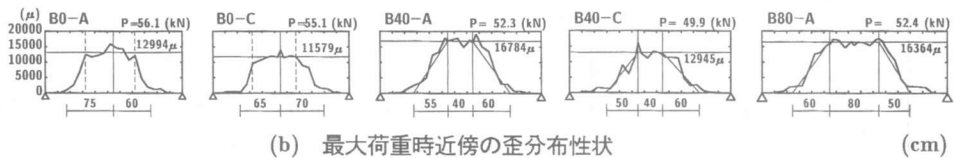
ト標準示方書に準拠して応力-歪関係を設定し、歪の線形変化を仮定して断面の曲げモーメント-曲率関係を求める断面分割法を用い、さらに弾性荷重法を援用して算定している。要素分割は断面方向には約5mm間隔の50分割、スパン方向には各ケース10cm間隔で行っている。なお、コンクリートの終局圧縮歪 ϵ'_{cu} は実験結果を参考に4,500 μ とした。表-3に実験結果および破壊形式を示す。表より、補強材別に比較すると、いずれの補強材を用いる場合に関してもB0試験体の最大荷重はB40, 80試験体よりも大きいことが分かる。また、各載荷幅ごとに比較すると、補強した試験体の実測最大荷重(以後、最大荷重)および最大荷重時変位はB0-A/Cで20%程度の差があるものの他は補強材に関わらずほぼ同等となっていることが分かる。このことから、補強材種別が荷重-変位関係に与える影響は少ないものと考えられる。

3.2 FRPシートの歪分布性状

図-3(a)に実験および計算によるFRPシートの歪分布性状を示した。計算結果は前述の断面分割法による結果を基に、スパン方向10cm間隔の位置における歪を算出し細線で示している。図には、剝離破壊したB0-A, B0-C, B40-Aおよびシート破断したB40-C, B80-Aに関して、①: P_y (梁中央部断面の主筋降伏)時、②: $0.8 P_{cal}$ (計算最大荷重 P_{cal} の80%)時、③: $0.9 P_{cal}$ 時、④: P_{cal} 時の歪分布を示している。ただし、B40-Cの場合は最大荷重が計算最大荷重よりも若干



(a) 主鉄筋降伏時から計算最大荷重時までの歪分布性状



(b) 最大荷重時近傍の歪分布性状 (cm)

図-3 FRP シートの歪分布性状

小さいため、④には最大荷重時近傍の歪分布を示した。また、シート破断した B80-C は同様にシート破断した B80-A よりも比較的小さな荷重レベルで 20,000 μ を越える歪が載荷点付近で多数発生して測定不良となったため、検討から除外している。

図より、計算値の歪分布は P_y 時 (①) から 0.8 P_{cal} 時 (②) において、等曲げ領域から主筋降伏領域に渡って歪が急激に増加していることが分かる。なお、計算結果は実験結果と良く対応していることから、シートの付着が十分に保たれている場合には計算により実験時の歪分布を精度良く推定できるものと判断される。その後、0.9 P_{cal} 時 (③)、 P_{cal} 時 (④) と載荷点付近のシートの歪はさらに増加するが、主筋の降伏域は顕著には拡大していない。また、実験結果は計算結果よりも小さく、特に B0 試験体は載荷点直下の歪が載荷荷重の増加に対応して増大する三角形分布から載荷点近傍ではほぼ一様な歪を有する台形分布に移行している。これは、後述するひび割れ分布性状からも明らかのように、一点載荷の場合にはせん断力の伝達に基づくアーチ状ひび割れが載荷点近傍で卓越し、その部分のシートがアーチ状ひび割れ

によるコンクリートの押し抜け作用の影響を受けていることを意味しているものと推察される。

図-3 (b) には最大荷重時近傍の歪分布を示している。ただし、B40-C、B80-A 試験体はシートが破断したため、実験結果にはシートが破断する直前のデータを用いた。図中には、付着強度を算定するために等曲げモーメント区間の歪の平均値 (以後、平均歪) および載荷点と平均歪の交点から支点側に向かって歪がほぼ 0 に収束するまでの位置 (以後、付着抵抗長さ) を示し、これらを細線で結んでいる。なお、B0 試験体の歪分布は最大荷重時近傍では前述のように台形分布となっているため、歪がほぼ一様である梁中央部のアーチ形成区間 (区間長 $L \approx 3 \times$ 梁高さ) を破線で示している。また、アーチ形成区間における歪の平均値を平均歪とし、載荷点から歪がほぼ 0 に収束する位置までの距離を付着抵抗長さとしている。ここで、二点載荷の場合には載荷点間において歪が一様となっているが、これはシートの剝離によるものではなく、載荷点間が等曲げモーメント区間であり、接着界面に発生する曲げせん断応力が 0 に近い状態になっているためであることに留意しなければならない。

表-4 FRP シートの付着性状

試験体名	最大荷重 (kN)	平均歪 (μ)	単位幅当たりの平均引張力 (kN/m)	平均付着抵抗長さ (m)	平均付着強度 (MPa)
B0-A	56.1	12,994	470.0	0.675	0.70
B0-C	55.1	11,579	446.0	0.675	0.66
B40-A	52.3	16,784	607.0	0.575	1.06
B40-C*	49.9	12,945	498.0	0.550	0.91
B80-A*	52.4	16,364	592.0	0.550	1.08

* シート破断した試験体

3.3 FRP シートの付着性状

表-4に、図-3 (b) から得られるシートの付着性状に関する実験結果を取りまとめた。表中、単位幅当たりの平均引張力は、平均歪に FRP シートの弾性係数とシートの厚さを乗じたものであり、平均付着抵抗長さは図-3 (b) の載荷点両側の付着抵抗長さを平均化したものである。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。

この表から、剝離破壊した B0 試験体は同様に剝離破壊した B40-A 試験体と比較して最大荷重が大きいにも関わらず、発生する平均歪が小さいことが分かる。これは、B0 試験体の場合には、最大荷重時に既にアーチ状ひび割れが卓越し、コンクリートの押し抜け作用の影響によりその部分の近傍からピーリング現象が生じてシートが剝離したためと考えられる。また、B40-C 試験体は B40-A 試験体に比して最大荷重、平均歪ともに小さいにも関わらず、シートが破断している。このことから、CFRP シートは AFRP シートに比して破断しやすい傾向にあるものと判断される。要因としては、CFRP シートは AFRP シートよりもしなやかさに欠けることや、シート破断歪が小さいことなどが考えられる。一点載荷ではシート剝離時の平均歪が二点載荷に比べて小さく、かつ、付着抵抗長さも若干長くなるため平均付着強度は 0.70 MPa 程度以下と小さい。一方、二点載荷では載荷幅やシートの材料種別に関わらず付着抵抗長さは 55 cm 程度とほぼ一定であり、平均付着強度は 0.9 ~ 1.1 MPa 程度となっている。

図-4 に、B40-A 試験体における動的測定結

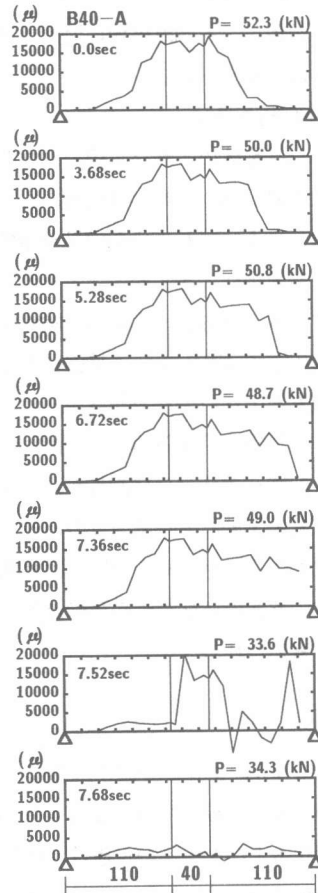


図-4 FRP シートの剝離挙動 (cm)

果より得られた、FRP シートの剝離挙動の一例を示す。図では最大荷重時の時刻を0とし、シートの剝離進展時およびシートの歪が完全に解放されれば0に低下するまでを示した。歪分布は、最大荷重時において等曲げモーメント区間の歪分布が一般的な台形分布を示しているが、その後一点載荷試験体と同様に右側のアーチ状ひび割れ発生

位置が起点となり剝離範囲が支点側に進展している。剝離範囲がシート末端に到達すると、シートは完全にコンクリート表面から剝離し、歪はほぼ0まで低下する。本試験体はアーチ状ひび割れの発生を抑制するため、せん断余裕度(せん断スパン比)を十分大きく設定している。しかしながら、試験体はアーチ状ひび割れが起因となるピーリング現象によって剝離破壊していることから、今後は、相対変位差に起因する剝離現象のみならず、ピーリング現象による剝離破壊に対する検討も必要であるものと考えられる。

3.4 ひび割れ性状

図-5に全試験体の実験終了後のひび割れ性状を示す。載荷幅が40cm以上の場合においてFRPシート補強によるひびわれ分散効果が発揮されており、特に載荷幅が大きくなるほどその効果は顕著に現れている。一方、一点載荷試験体では他の試験体と比較してFRPシート補強によるひび割れの分散効果が小さいようである。これは、他の試験体では主筋降伏時から曲げひび割れの分散が顕著になり、アーチ状のひび割れがわずかに発生する程度で最大荷重に至っているのに対し、一点載荷試験体は曲げひび割れの分散が広範囲に進展する前にアーチ状のひび割れが載荷点近傍で卓越したためと考えられる。

4. まとめ

本研究ではFRPシートで曲げ補強したRC梁を用いた静的載荷実験を行い、載荷点間隔がRC梁の耐荷性状およびシートの付着性状に与える影響について実験的に検討した。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- (1) 二点載荷の場合は、断面分割法を応用することによって、実験時のシートの歪分布を比較的精度良く推定できる。
- (2) 一点載荷試験体はアーチ状のひび割れが発生しやすく、ひび割れ位置近傍におけるピーリング現象が起因となってシートの剝離が支点側に進展しやすい。この場合のシート剝離時の歪は二点載荷試験体の剝離時の歪に比べて

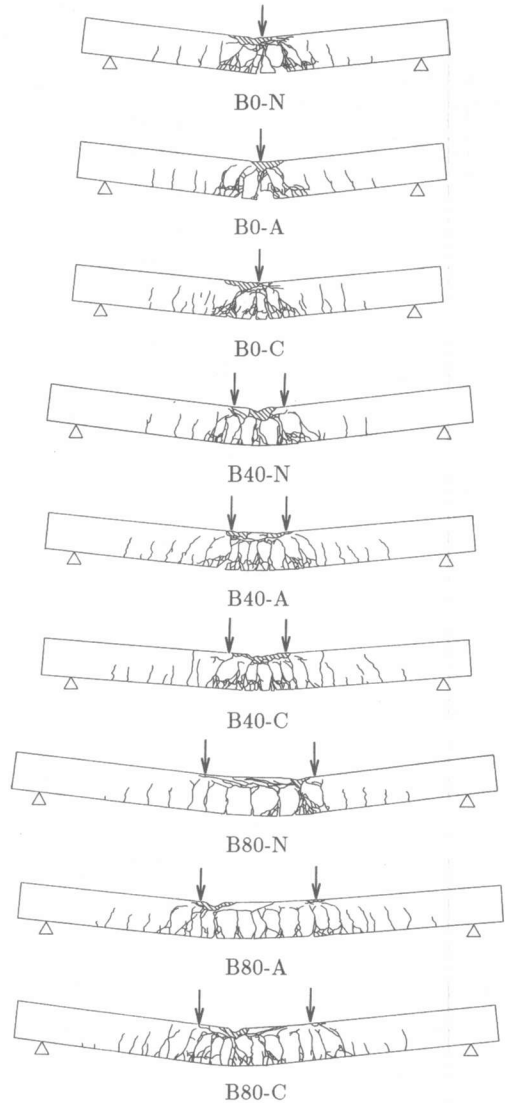


図-5 ひび割れ性状

小さいため、平均付着強度は小さくなる。

- (3) 二点載荷試験体では載荷点の間隔やシート材料の種類に関わらず平均付着抵抗長さは55cm程度であり、平均付着強度は0.9~1.1MPa程度である。

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，土木学会構造工学論文集，Vol.45A，pp.1399-1410，1999.3