

FRP シート曲げ補強 RC 梁のスパン方向偏心載荷時における耐荷性状

Bending Capacity of Strengthened RC Beams with FRP Sheet
under Eccentric Laterally Loading

岸 徳光* 三上 浩** 池田 憲二*** 栗橋 祐介****

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Kenji IKEDA, and Yusuke KURIHASHI

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

** 工博 三井建設(株)技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

*** 北海道開発局開発土木研究所 室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)

**** 工修 室蘭工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

In order to establish a rational flexural strengthening method of Reinforced Concrete (RC) members with Fiber Reinforced Plastic (FRP) sheet, static loading tests are conducted using strengthened RC beams with FRP sheet. In this paper, bending capacity of the beams under symmetric and eccentric loading is investigated. Performing the experiments varying the bonding area of sheet in case of eccentric loading, the effects of the strengthening area on bending capacity of the RC beams and flexural bonding capacity of the sheet are discussed. The results obtained from these experiments are as: 1) the maximum bending moment capacity of strengthened RC beams is not affected by the eccentricity of loading; 2) in case of eccentric loading, the RC beams intend to occur the delamination failure due to a peeling action of concrete block formed near the lower cover concrete in the small shear-span side; and 3) if the required anchorage zone length is satisfied, bonding strength may be 1.0 - 1.2 MPa irrespective of location of loading and bonding length of sheet.

Keywords: flexural strengthening, FRP sheet, eccentric loading, bonding area, peeling action

1. まえがき

阪神淡路大地震を契機として、社会基盤施設 RC 構造物に対する耐震補強工事や老朽化対策としての補修工事が各地で盛んに行われている。これらの補修・補強工事には RC 巻立て工法や鋼板接着工法をはじめとする種々の工法が用いられているが、近年軽量で施工性に優れている FRP シート接着工法も多く採用されるようになった。FRP シート接着工法には、シートを RC 柱や RC 橋脚の周方向に巻き付けるせん断・靱性補強工法や、部材軸方向に貼り付ける曲げ補強工法などが挙げられる¹⁾。特に、曲げ補強工法を採用する場合にはコンクリートと FRP シートの界面における剝離破壊が想定されることから、シートの付着性能に関する検討が重要となる。しかしながら、FRP シートの曲げ付着性状や剝離問題を定量的に検討した研究事例は比較的少なく、未だ RC 部材の FRP シート接着工法に関する合理的な曲げ補強設計指針が確立されていないのが現状である。

このような観点から、著者らはこれまでコンクリートと FRP シートの付着性状に着目した実験的研究を行ってきた²⁾。実験方法としては、実構造物における付着性状や剝離挙動を再現するために底面に FRP シートを接着して曲げ補強をした RC 部材(梁)を用いた静的曲げ載荷実験法を採用している。その結果、同手法に基づい

た実験結果は、FRP シートの付着性能評価方法として一般的に用いられているコンクリートと FRP シートの一面せん断をモデル化した一軸引張試験結果³⁾に比較して、付着抵抗長さ(載荷点から支点側に向かってシートの歪がほぼ零に収束する範囲)が大きくかつ付着強度が小さく評価され、上述の一軸引張試験結果と大きく異なることを確認している。

本研究ではさらに荷重が任意点に作用する場合等、より実構造物に即した検討を行うために、FRP シートを RC 梁底面に接着して曲げ補強した RC 梁に関する中央 1 点載荷およびスパン方向偏心 1 点載荷実験を行った。特に、偏心載荷実験においては、FRP シートの接着範囲が RC 梁の耐荷性状やシートの曲げ付着性状に与える影響についても検討している。また、本実験では曲げ付着性状に与える FRP シートの材料特性の影響を検討するため、いずれの補強試験体に対してもアラミド繊維シート(以後、AFRP シート)および炭素繊維シート(以後、CFRP シート)を用いた実験を行っている。測定項目は載荷荷重、載荷点変位および FRP シートの歪分布である。これらの出力は、突発的であつ短時間の間に生ずるシートの剝離現象をも適確に収録するために、全てデータレコーダを用いて連続的に測定している。なお、FRP シート接着工法において RC 梁の曲げ補強法を採

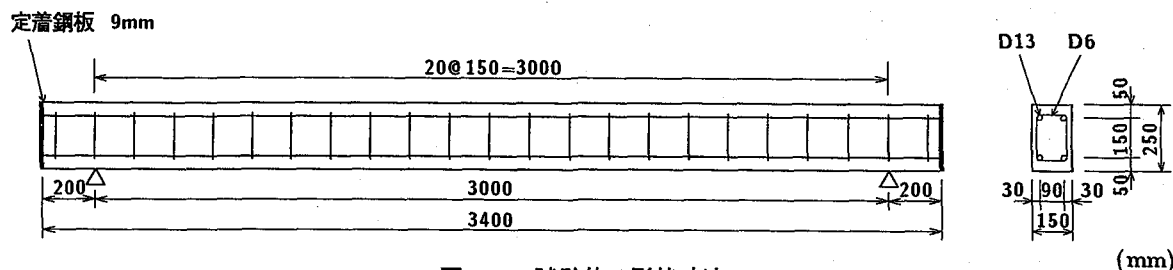


図-1 試験体の形状寸法

用する場合、底面接着のみならず側面接着を行うことも可能である。しかしながら、側面接着の場合には 1) 効率的な曲げ補強が不可能であることや、2) 曲げのみならずせん断補強効果も期待でき、曲げ補強効果を適切に評価できない可能性があることより、本研究では底面接着の場合についてのみ検討することとした。また、本研究は RC 構造物の耐震補強を想定し、かつ研究事例の少ない RC 部材に接着した FRP シートの曲げ付着性状に関する基礎的資料の収集を目的としていることより、初期ひび割れの導入等は考慮せずに新設の RC 梁を補強することによって検討することとした。

2. 実験概要

表-1 に本実験に用いた試験体の一覧を示す。本実験は全て静的 1 点荷重により、中央荷重試験体：2 体、偏心荷重試験体：6 体の合計 8 体を用いて実施している。偏心荷重試験体に関しては、FRP シートの接着範囲が RC 梁の耐荷性状に与える影響を検討するために、その範囲を 3 種類に変化させている。表中、試験体名のうち第 1 項目は荷重位置 (C：中央荷重，E：偏心荷重)，第 2 項目は補強材料の種類 (A：AFRP シート，C：CFRP シート)，第 3 項目は偏心荷重実験における FRP シートの接着範囲 (3 種類) を示している。特に第 3 項目は、せん断スパン比 a/d の大きい領域を対象として、荷重点から支点の 10 cm 内側までの 190 cm 間にシートを接着する場合を 4/4 (全面接着)，以下 140 cm，90 cm 部分に接着する場合を全面接着に対する概略割合である 3/4，2/4 として示すこととした。

図-1 に試験体の形状寸法を示す。試験体は純スパン 3 m，断面寸法 25 × 15 cm で、軸方向鉄筋として SD295D13 を上下に 2 本ずつ配置し、試験体の両端に取り付けた厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定している。スターラップには SD295 D6 を用い、15 cm 間隔で配筋している。偏心荷重における荷重位置は純スパンの 2：1 内分点とした。この時の a/d は試験体の左右でそれぞれ 10.0，5.0 である。なお、中央荷重の場合における a/d は 7.5 となっている。

図-2 には RC 梁底面における FRP シートの接着概要を示している。本実験では曲げ補強材料として幅 80

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材料	載荷方法	全面接着を 4/4 とした接着範囲 (偏心載荷時)	せん断 スパン比 a/d
C-A	AFRP	中央載荷	(全面接着)	7.5
C-C	CFRP			
E-A-4/4	AFRP	偏心載荷	4/4	10.0/5.0
E-C-4/4	CFRP			
E-A-3/4	AFRP		3/4 程度	
E-C-3/4	CFRP			
E-A-2/4	AFRP		2/4 程度	
E-C-2/4	CFRP			

mm の AFRP シートもしくは CFRP シートを用い、各実験ケースごとに設定した範囲に接着している。なお、著者らによる既往の研究より、コンクリートと FRP シートの曲げ付着性能向上のためにはチッピング処理によるコンクリート表面の異形化が最も効果的であることが明らかになっていることより²⁾、本研究においては実務に供されているショットブラスト工法による処理を行うこととした。なお、ブラスト処理によるチッピング深さは平均 1 ～ 2 mm 程度である。シート補強量は両補強シートにおいて引張軸剛性がほぼ同等となるように、AFRP シート，CFRP シート補強の場合にそれぞれ目付量 (単位面積当りの質量) 415 g/m²，300 g/m² のシートを 1 層用いることとした。なお、図中の ● 印は FRP シート上への歪ゲージ貼り付け位置を示している。歪ゲージにはゲージ長 10 mm の箔歪ゲージを用い、いずれの場合も 10 cm 間隔および荷重点直下に貼り付けている。

試験体はコンクリート設計基準強度 $f'_{ck} = 23.5$ MPa として、いずれの RC 梁に対してもせん断耐力が FRP シート破断時の曲げ耐力よりも十分大きく、曲げ破壊先行型になるように断面設計している。なお、各 RC 梁のせん断耐力はコンクリート標準示方書⁴⁾に準じた修正トラス理論を、曲げ耐力は断面分割法を用いて算定している。実験時のコンクリートは、材齢が 65 日で平均圧

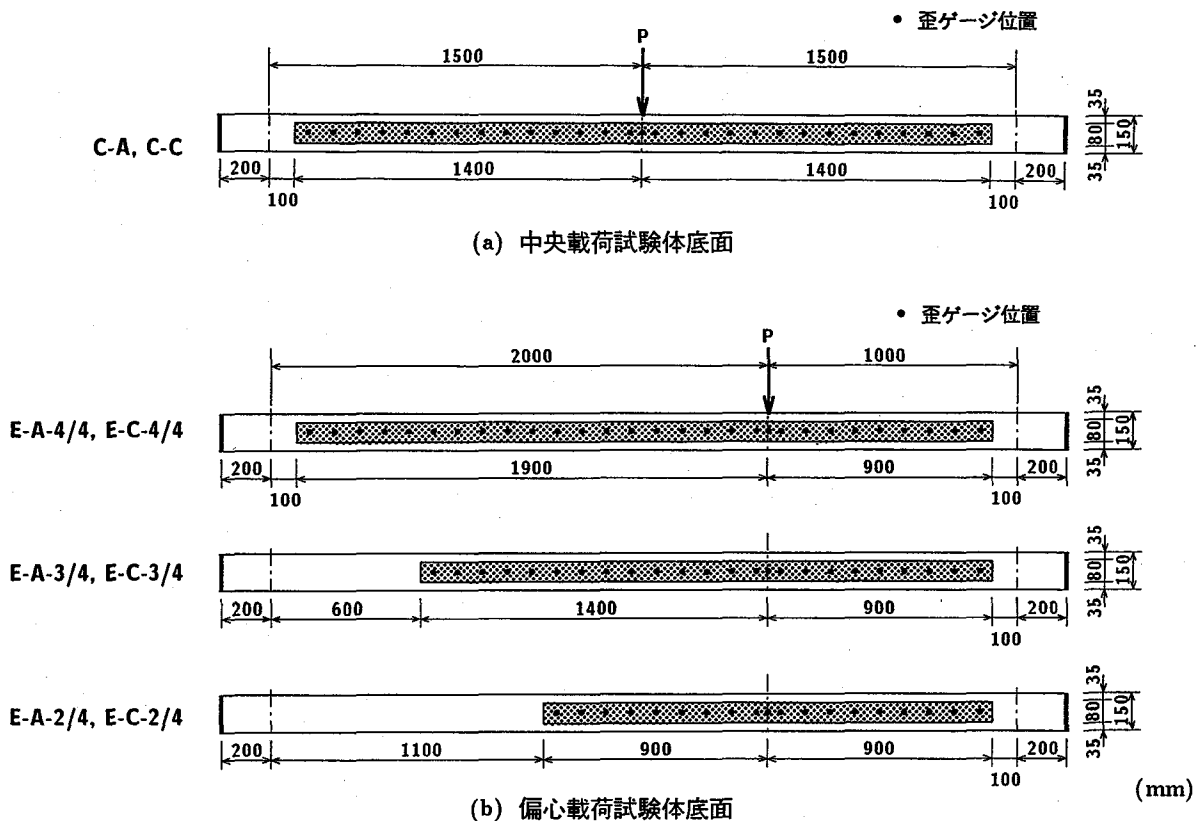


図-2 RC 梁底面に接着した FRP シートの概要

縮強度 $f'_c = 23.93 \text{ MPa}$ であった。また、鉄筋の引張試験結果より、軸方向鉄筋の降伏強度は 0.36 GPa 、引張強度は 0.52 GPa であり、スターラップの降伏強度は 0.39 GPa 、引張強度は 0.55 GPa であった。表-2 には本実験に用いた FRP シートの公称の力学的特性を示している。測定項目は、静的荷重測定用ロードセル (容量: 196 kN) 出力、シート上に貼付した歪ゲージ出力および載荷点直下に設置した非接触式レーザ変位計出力である。本実験では、シート剥離が突発的にかつ瞬時に終了する現象であることより、各出力を連続して精度良く測定するためにデータレコーダを用いて一括収録することとした。各出力結果は A/D 変換を行い、かつ各物理量に変換している。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

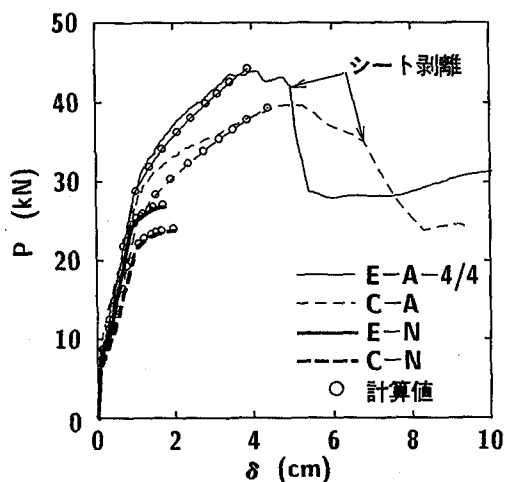
図-3 には中央載荷および偏心載荷試験体のうちシートをスパン方向に全面接着した試験体に関する荷重-変位関係を補強シート別に示している。図中、無補強試験体については計算結果を代用し、-N として区別している。計算結果は無補強、補強試験体ともに ○ 印を付した線で示しており、前述の実験時におけるコンクリートの圧縮強度、鉄筋の引張試験結果および FRP シートの公称の力学的特性を適用し、断面分割法により曲げモーメント-曲率関係を求めることによって評価している。なお、断面分割法の適用に際しては、コンクリートの応

表-2 FRP シートの公称の力学的特性値

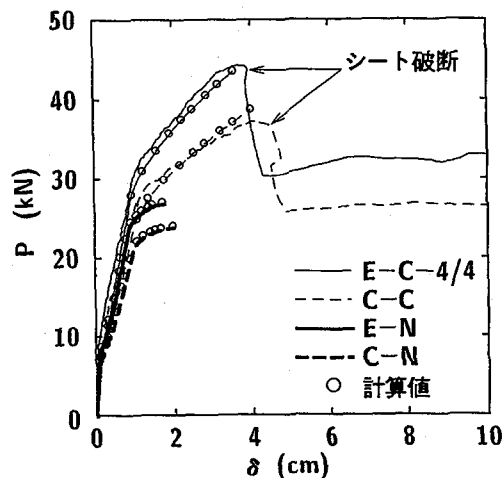
シート名	目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
AFRP	415	0.286	126.51	2.48	1.96
CFRP	300	0.167	230.46	4.07	1.77

力-歪関係には帯鉄筋 (スターラップ) の横拘束効果を考慮した道路橋示方書耐震設計編⁵⁾に基づき、FRP シートが破断に至るまでを考慮している。断面分割は安定した解が得られるように一要素長約 5 mm の 50 分割とし、変位はスパン方向の分割を一要素長 100 mm の 30 分割とし、線形な曲率変化を仮定して算定している。

図より、シートの種類に関わらず補強した試験体の載荷荷重は無補強 (計算値) と異なり、荷重-変位関係のなす勾配が変化する主鉄筋の降伏後も顕著に増大し、その後シートの剥離もしくは破断により急激に減少して、無補強の荷重レベルに至っていることがわかる。また、各実験ケースにおいてシートの完全付着を想定した補強試験体の計算結果は実験結果を比較的良く再現していることから、本実験におけるコンクリートと FRP シートの付着は最大荷重近傍まで良好であったものと推察される。また、計算結果と実験結果が比較的良く対応していることをよりどころとして、中央載荷時と偏心載荷時の最大曲げモーメント値が等しいと仮定すれば、初等力学に基づいた試算により、偏心載荷時の RC 梁の曲げ耐力

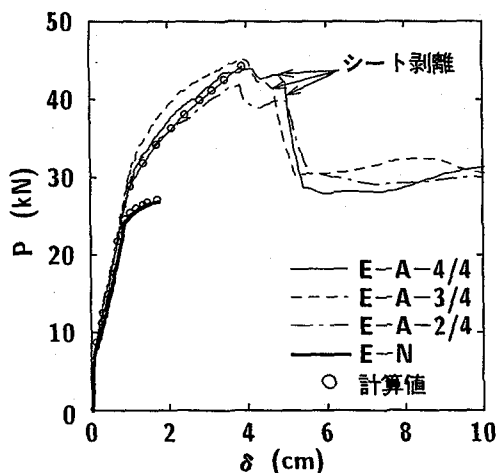


(a) AFRP シート補強

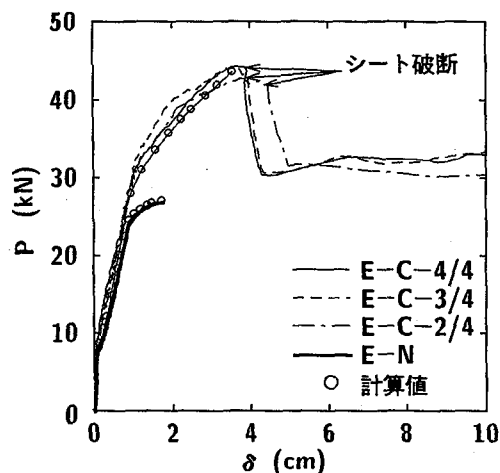


(b) CFRP シート補強

図-3 荷重-変位関係 (載荷位置の影響)



(a) AFRP シート補強



(b) CFRP シート補強

図-4 荷重-変位関係 (接着範囲の影響)

は中央載荷時の 1.2 倍程度となる。

図-4 には偏心載荷試験体における接着範囲の異なる試験体の荷重-変位関係を補強シートの種類ごとに示している。AFRP シートおよび CFRP シート補強試験体ともにシートの接着範囲に関わらず、ほぼ同様の荷重-変位関係を示しているが、接着範囲の狭い -2/4 試験体の最大荷重が他に比べて若干小さいことがわかる。また、両補強試験体の最大荷重時近傍における荷重-変位関係を詳細に検討すると、AFRP シート補強試験体は CFRP シート補強試験体と異なり、荷重は最大荷重到達後急激には低下せず、変位が 0.5 ~ 1.0 cm 程度増加した後に無補強の荷重レベルまで低下していることがわかる。これは、後述のひびわれ性状で示しているように最大荷重時近傍において曲げひび割れと斜めひび割れによって下縁かぶりコンクリート部に形成されたコンクリートブロックの押し抜きによるピーリング作用 (シートの引き剥がれ) によって部分剥離が生じ、その後徐々に剥離範

囲が支点側に進展し、最終的に剝離破壊に至ったためと考えられる。一方、CFRP シート補強試験体の場合には、最大荷重到達後急激に耐力が低下している。これは、AFRP シート補強試験体の場合とは異なり、後述の表-3 に示しているように最大荷重時に CFRP シートが破断したためである。

表-3 には最大荷重、最大荷重時変位とシート剥離時の変位および破壊状況に関する一覧を示している。なお、破壊は全て梁上縁のコンクリートが一部圧壊し始めた状態で生じている。表より、最大荷重および最大荷重時変位はシートの種類に関わらず、中央載荷の場合はそれぞれ 38 ~ 40 kN, 4.1 ~ 5.0 cm, 接着範囲の狭い -2/4 試験体を除いた偏心載荷の場合は 44 ~ 46 kN, 3.6 ~ 4.1 cm, -2/4 試験体の場合は 43 kN, 3.8 cm 程度であることがわかる。このことから、FRPシートの引張軸剛性が同等の場合には、シートの材料特性は最大荷重および最大荷重時変位に大きな影響を与えないことがわかる。一方、偏

表-3 実験結果の一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位 (cm)	シート剥離時 変位 (cm)	破壊状況
C-A	40.0	4.99	6.72	剝離破壊 (左側せん断スパン)
C-C	37.9	4.15	—	シート破断
E-A-4/4	44.6	4.10	4.82	剝離破壊 (右側せん断スパン)
E-C-4/4	44.8	3.66	—	シート破断
E-A-3/4	45.8	3.88	4.66	剝離破壊 (右側せん断スパン)
E-C-3/4	44.7	3.62	—	シート破断
E-A-2/4	42.8	3.82	4.84	剝離破壊 (右側せん断スパン)
E-C-2/4	42.7	3.84	—	シート破断

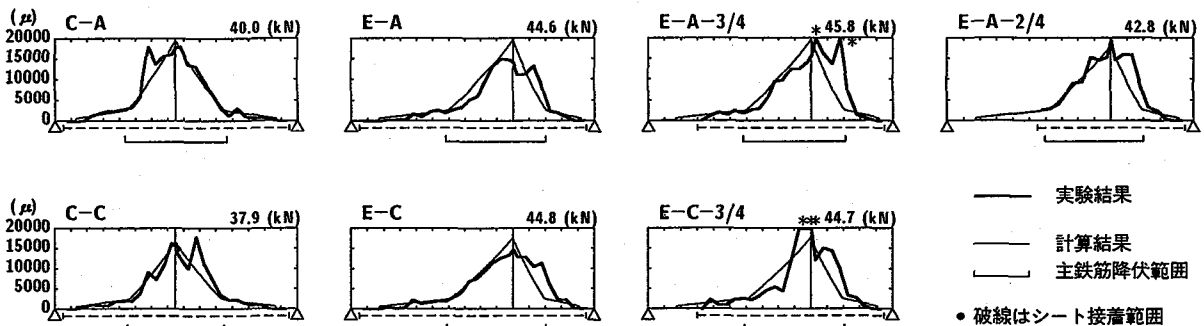
(*: 20,000 μ 以上の歪が発生している箇所)

図-5 最大荷重時の FRP シートの歪分布に関する実験結果と計算結果の比較

心載荷において、接着範囲が -2/4 程度と比較的狭い場合の最大荷重は他に比べて若干小さく、接着範囲が曲げ耐荷挙動に影響を与えていることがわかる。

AFRP シート補強試験体の場合は全て剝離破壊しているのに対して、CFRP シート補強試験体の場合は全てシート破断により終局に至っていることより、CFRP シート補強試験体は AFRP シート補強試験体に比して、シート破断を生じやすい傾向にあることがわかる。これは、CFRP シートが AFRP シートに比して脆く材料のしなやかさに欠けることや、表-2に示されているように破断歪が小さいことに起因しているものと考えられる。なお、表-3に示したように AFRP シート補強した偏心載荷試験体は全てせん断スパン長の短い右側スパンにおいて剝離破壊を生じている。これは、せん断スパン長の短い領域ではせん断スパン長の長い領域に比して作用せん断力が大きいと斜めひび割れが発生しやすく、かつ曲げひび割れとの連成により形成されたコンクリートブロックによるピーリング作用力も大きいと推察される。

3.2 FRP シートの歪分布

図-5には最大荷重時の FRP シート歪分布に関する実験結果と計算結果を比較して示している。なお、E-C-2/4 試験体は最大荷重時に多くの測点で 20,000 μ を越える歪が発生し測定不良となったため検討から除外している。また、その他の試験体において 20,000 μ を越える

歪が発生した測点には * 印を付している。図中の主鉄筋降伏範囲も含めた計算結果は、前述した断面分割法の結果を基にスパン方向に 1 cm 間隔にシート歪を算出して得られたものである。また、図にはシートの接着範囲を破線で示している。図より、載荷位置、シートの種類およびシートの接着範囲に関わらず、実験結果と計算結果は比較的良好に対応していることがわかる。載荷点近傍の歪が支点側に向かって線形に減少すると仮定した場合の載荷点から零歪位置までの距離を付着抵抗長として定義すると、いずれの場合もその長さは実験値と計算値で良好に対応している。また、計算結果において、シートの歪が大きく示されている範囲は主鉄筋の降伏範囲に対応していることから、FRP シートの付着抵抗長は主鉄筋の降伏範囲にほぼ対応していると云える。

接着範囲の狭い E-A-2/4 試験体は、せん断スパン比の大きい左側スパンの接着範囲が 90 cm であり、主鉄筋降伏範囲 (計算値) や後述の付着抵抗長 (実験値) が 80 cm であるに対して 10 cm 程度の余裕しかない。そのため、左側のシート接着端部近傍では 2,500 ~ 3,000 μ 程度の歪が発生している。このことから、E-A-2/4 試験体では主鉄筋の降伏範囲がシートの接着端部まで拡大してその部分がシートの接着端部より大きな引張力を負担し、付着長が不足した状態となっているものと推察される。なお、E-A-2/4 試験体の最大荷重は接着範囲の広い E-A-3/4, 4/4 試験体に比して小さいものとなってい

(*: 20,000 μ 以上の歪が発生している箇所)

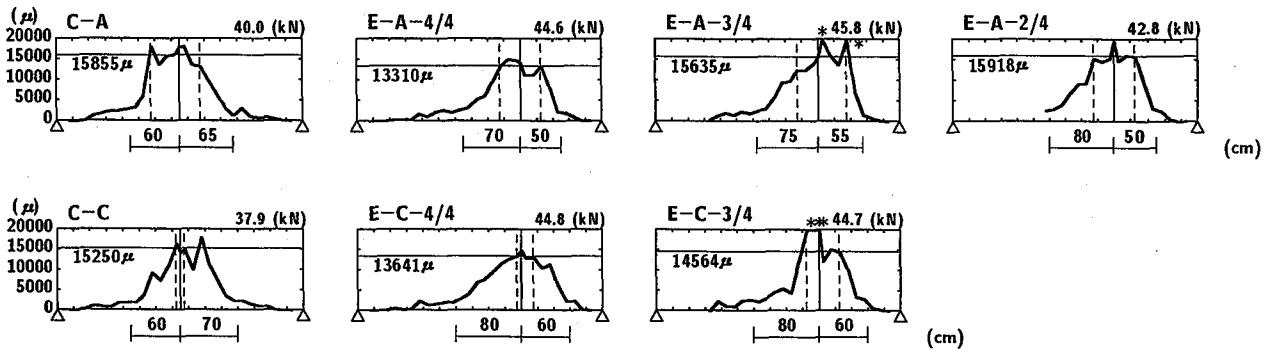


図-6 最大荷重近傍における FRP シートの付着抵抗長さと平均最大歪

表-4 FRP シートの付着性状

試験体名	最大荷重 (kN)	平均最大歪 (μ)	単位幅当りの平均 引張力 (kN/m)	付着抵抗 長さ (m)	付着強度 (MPa)
C-A	40.0	15,855	573.6	0.60/0.65	0.98/0.90
E-A	44.6	13,310	481.6	0.70/0.50	0.70/0.98
E-A-3/4	45.8	15,635	565.7	0.75/0.55	0.77/1.05
E-A-2/4	42.8	15,918	575.9	0.80/0.50	0.73/1.17
C-C	37.9	15,250	586.9	0.60/0.70	0.98/0.84
E-C	44.8	13,641	525.0	0.80/0.60	0.66/0.88
E-C-3/4	44.7	14,564	560.5	0.80/0.60	0.70/0.93

るが、これは上記の付着長の不足に起因するものと考えられる。このことは、CFRP シート補強した接着範囲の狭い E-C-2/4 試験体についても同様と云える。

図-6 には FRP シートの曲げ付着特性を検討するために最大荷重近傍における FRP シートの付着抵抗長さと載荷点近傍部の平均最大歪の実験結果を示している。また、載荷点近傍部の歪がほぼ一定値を示している区間を縦の細破線で示している。

図より、AFRP シート補強した場合には、CFRP シート補強した場合に比較して歪がほぼ一定値を示す区間がより明確に示されている。すなわち、静的 1 点載荷により実験を行っているにも関わらず、歪分布は曲げモーメント分布に対応した載荷点を頂点とする三角形分布ではなく、2 点載荷時に示されるような台形分布を呈している。これは前述のように載荷点直下近傍に発生した曲げひび割れと斜めひび割れが交叉することによって下縁かぶりコンクリート部がブロック化し、この小さなブロックがシートを下方に押し込み、シートがピーリング作用を受けていることを示している。また、このような AFRP シート補強した場合における載荷点近傍の歪の均等化は、AFRP シートが破断しにくいことに伴う荷重分散を期待できることを示している。

一方、CFRP シート補強試験体の場合には AFRP シート補強試験体の場合と異なり、載荷点近傍部に歪が大きくなる傾向にあるものの台形分布状にはなっていない。これは、かぶりコンクリートがブロック化してシートを

下方に押し込むピーリング作用が出現しているものの、シートが剝離する前に損傷が局所的に集中して破断するためと推察される。このことは、C-C、E-C-3/4 試験体において局所的に破断歪である 17,700 μ を越える歪が発生し、シート破断に至っていることから裏付けられる。なお、E-C-4/4 試験体の場合にはシート破断したにも関わらず歪は最大で 15,000 μ 程度である。これは、歪ゲージ貼り付け位置から多少離れた領域で局所的にシートが損傷を受け破断に至ったためと推察される。これより、CFRP シートを用いて曲げ補強する場合には、局所的に損傷が集中し、シート厚が不十分な場合には破断に至る可能性のあることが明かになった。

3.3 FRP シートの付着性状

表-4 には、図-6 より得られるシートの付着性状に関する実験結果を整理している。ここで、単位幅当たりの平均引張力は、平均最大歪に FRP シートの弾性係数とシートの厚さを乗じたものである。また、付着強度は単位幅当たりの平均引張力を付着抵抗長さに除したものである。なお、付着抵抗長さおよび付着強度は試験体左右の各せん断スパンについて示している。表には剝離破壊した AFRP シート補強試験体と、シート破断した CFRP シート補強試験体の結果を分けて整理している。

表より、補強シートの種類に関わらず偏心載荷における付着抵抗長さは左右のせん断スパン長で異なり、せん断スパン比 a/d の小さなスパンで短く、大きなスパンで長い結果となっていることがわかる。 a/d の小さなスパン

シートの付着抵抗長さはシートの接着範囲に関わらずほぼ一定であり、AFRP シート補強が CFRP シート補強に比べて短い。一方、 a/d の大きい側の付着抵抗長さは、特に接着範囲の狭い E-A-2/4 試験体において、前述のように主筋降伏範囲がシートの接着範囲と同程度にまで広がることより、他の試験体より大きく示されている。

前述の通り、FRP シートの剝離は AFRP シート補強試験体において、中央載荷の場合は左側スパンで、偏心載荷の場合は全て a/d の小さい右側スパンで剝離破壊が生じている。剝離破壊を生じたスパンにおける付着強度は、載荷位置やシートの接着範囲に関わらず、ほぼ 1.0 ～ 1.2 MPa 程度を示している。一方、CFRP シート補強試験体の場合には、全てシート破断によって終局に至っていることより、全般的に付着強度が AFRP シート補強に比べて小さく、偏心載荷の場合には a/d の小さい右側スパンで 0.8 ～ 0.9 MPa 程度であった。

図-7 には、シートの剝離過程を検討するために AFRP シートを全面に接着した C-A および E-A-4/4 試験体のシート剝離時近傍における歪分布の動的測定結果を示している。図には最大荷重時の時刻を起点としてシートの剝離が終了して歪がほぼ零レベルに解放される時点までの約 10 sec 間の経時変化を示している。両試験体ともに最大荷重時以後、載荷点近傍部に発生する歪レベルと同程度の歪を示す領域が時間経過とともに支点側に進展していることがわかる。特に、C-A 試験体の 4.80 sec、E-A-4/4 試験体の 5.92 sec 経過後の歪分布には、それ以前の歪分布に比べて歪が急増した箇所（図中、矢印）が明瞭に認められる。一方、実験時には、剝離破壊した側のスパンにおいて曲げひび割れと斜めひび割れが交叉することにより形成される小さなコンクリートブロックが荷重の増加とともにシートを下方に押し広げ剝離を進展させていることを確認している。これより、最大荷重時近傍において発生した下縁かぶりコンクリート部に形成されたブロックによるピーリング作用に起因する部分剝離が支点側に向かって徐々に範囲を拡大し、剝離破壊に至る現象がより一層明確なものとなった。

3.4 ひび割れ性状

図-8 には全試験体の実験終了後のひび割れ状況を示している。スパン中央部に載荷した C-A、C-C 試験体は、ともに載荷点近傍下縁かぶりコンクリート部には曲げひび割れと斜めひび割れが交叉して小さなコンクリートブロックを形成し、載荷点より離れた領域には曲げひび割れがほぼ左右対称に発生している。これに対して、スパンの 2 : 1 内分点に載荷した全ての偏心載荷試験体では左右のせん断スパンで全く異なったひび割れ性状を示している。すなわち、 a/d の大きい左側に発生したひび割れは曲げひび割れが主体となっているが、 a/d の小さい右側にはピーリング現象の要因となる曲げひび割れと斜めひび割れが交叉して生じる小さなコンクリートブロックが多数形成されていることがわかる。これは、前述し

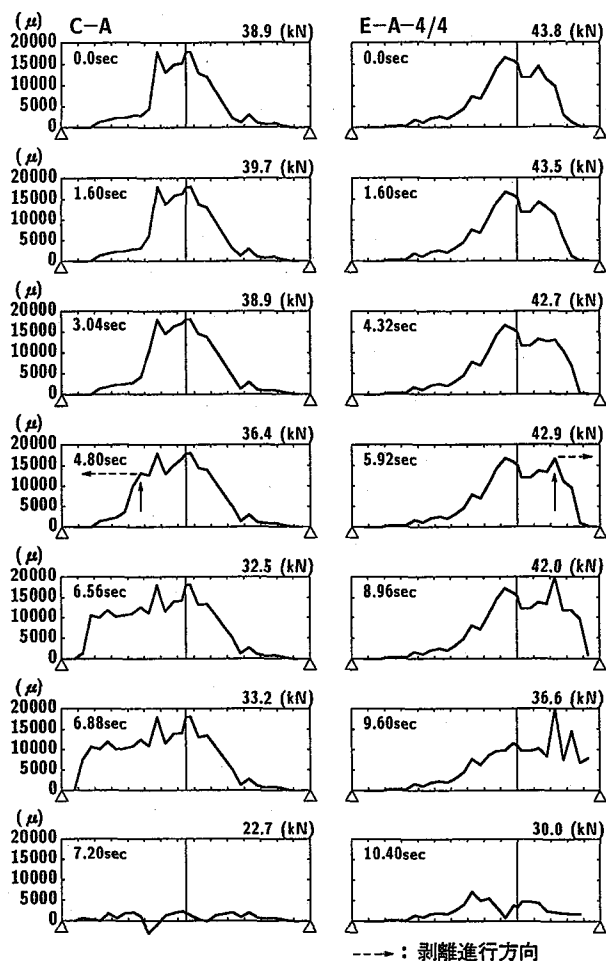


図-7 剝離破壊時における FRP シートの歪分布

たように、左側と右側の a/d がそれぞれ 10.0, 5.0 であり、 a/d の小さい側は大きい側に比して作用せん断力が大きくせん断ひび割れが生じやすい状況にあるためと考えられる。

剝離破壊した AFRP シート補強試験体の載荷点直下周辺にはピーリング現象の要因となる斜めひび割れが大きく開口している様子が見受けられる。図にはピーリング発生位置を矢印により表示している。また、CFRP シート補強した試験体は全てシート破断したものの、載荷点近傍には AFRP シート補強試験体と同様に下縁かぶりコンクリート部には小さなコンクリートブロックが多数形成されている。

4. まとめ

本研究では、実構造物に供される RC 部材の補強問題を想定し、FRP シートで曲げ補強する場合の RC 梁を取り上げ、対称荷重載荷や偏心荷重載荷時の耐荷性状およびシートの曲げ付着性状に関する検討を行った。また、偏心載荷試験体に関してはシートの接着範囲の耐荷性状およびシートの曲げ付着性状に与える影響についても検討を行っている。本実験では、シート材料の違いに

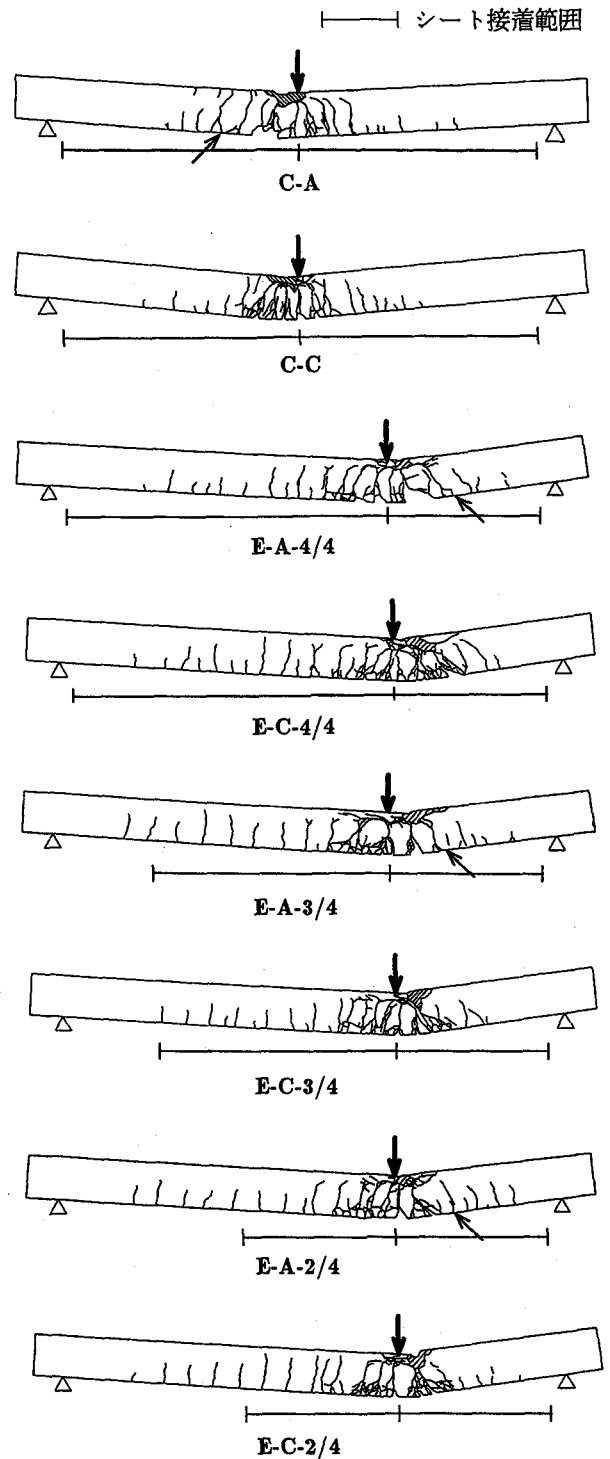
よる影響も検討するため、AFRP シートおよび CFRP シートを取り上げ、引張軸剛性がほぼ等しい状態で実験を行っている。本実験の範囲内において得られた結果を総括すると、以下の通りである。

- (1) シートの接着範囲が十分に広い場合には、補強後の RC 梁の最大耐力は補強材料に関わらず断面分割法によって求めた計算値とほぼ対応する。
- (2) AFRP シート補強試験体の場合は、いずれの場合もシートの剝離によって終局に至っているのに対して、CFRP シート補強試験体の場合には全てシートの破断により終局に至っている。これより、CFRP シートを用いる場合には AFRP シートを用いる場合よりも脆性的であることに留意すべきであるものと判断される。
- (3) AFRP シート補強した偏心載荷実験結果より、作用せん断力が大きい a/d の小さいせん断スパンの領域において剝離破壊を生ずる傾向にある。
- (4) FRP シートの付着抵抗長さは断面分割法によって求められる主鉄筋の降伏範囲にほぼ一致する。
- (5) AFRP シートの剝離は曲げひび割れと斜めひび割れの交叉によって発生するかぶりコンクリートの押し抜け作用に伴うピーリング現象により生じる。
- (6) AFRP シート補強試験体の剝離破壊を生じたせん断スパンにおける付着強度は、載荷位置やシートの接着範囲に関わらず $1.0 \sim 1.2 \text{ MPa}$ 程度である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像－性能照査補強設計指針（試案）－，1998。
- 2) 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。
- 3) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会 報告書（Ⅱ），1998。
- 4) コンクリート標準示方書（平成 8 年制定）設計編，土木学会，1996。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説，1996。

（1999 年 9 月 17 日受付）



図－8 実験終了後のひび割れ状況