室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

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

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 土木学会 公開日: 2012-04-26 キーワード (Ja): キーワード (En): flexural strengthening, FRP sheet, required bonding length, bonding strength 作成者: 岸, 徳光, 三上, 浩, 佐藤, 昌志, 栗橋, 祐介 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1039

室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

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

その他（別言語等）のタイトル	Experimental study on flexural bonding property of RC beams strengthened with FRP sheet
著者	岸　徳光，三上　浩，佐藤　昌志，栗橋　祐介
雑誌名	構造工学論文集．A
巻	45
ページ	1399-1410
発行年	1999-03
URL	http://hdl.handle.net/10258/1039

構造工学論文集　Vol. 45A (1999年3月)　　土木学会

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

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BONDING PROPERTY
OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH FRP SHEET

岸　徳光 *　三上　浩 **　佐藤昌志 ***　栗橋祐介 ****
Norimitsu KISHI , Hiroshi MIKAMI , Masashi SATO 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　主任研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)
*** 工博　北海道開発局開発土木研究所　構造研究室　室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)
**** 室蘭工業大学大学院　工学研究科建設システム工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

In this paper, in order to cumulate fundamental data for establishing a rational flexural strengthening method of RC structure with FRP (Fiber Reinforced Plastic) sheet, flexural bonding property of AFRP and/or CFRP sheets bonded on the bottom surface of RC beams is investigated by a static loading test. This study is composed of two series which are : 1) an experiment for finding a optimum treating method for the sheet bonded on concrete surface ; 2) an experiment for studying on the flexural bonding property when material and volume of FRP sheet are varied. The results obtained from these experiments are as follows ; 1) a heavy chipping treatment method is the most effective among four treatment ones, 2) the bigger the FRP density, the longer the required bonding length is, 3) the mean value of bonding strength for all the AFRP/CFRP sheets used here may be 0.7~0.8 MPa.

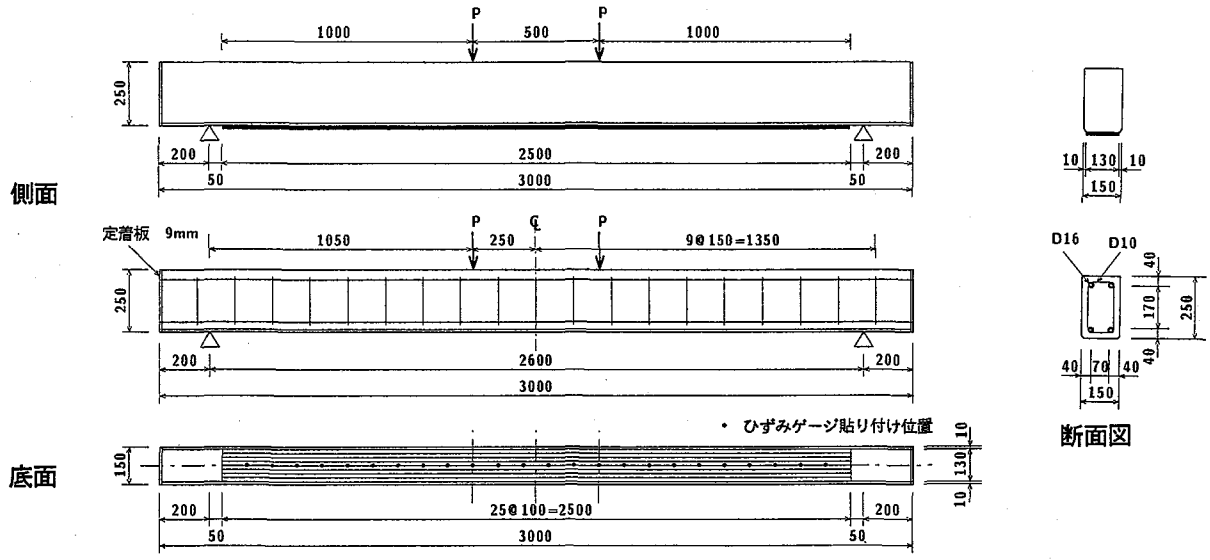
Keywords : flexural strengthening, FRP sheet, required bonding length, bonding strength

1. まえがき

平成7年1月に発生した阪神・淡路大地震以降，道路・鉄道橋脚など既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物を対象として耐震補強工事が盛んに行われている。RC 橋脚の耐震補強工法としては，せん断耐力および靭性能の向上を目的とした鋼板巻き立て工法や RC / PC 巻き立て工法が一般的に採用されているようであるが[1]，最近では軽量かつ高強度で施工性および耐蝕性に優れた繊維強化プラスチック (以下，FRP) シートによる巻き付け工法も採用されるようになってきた。著者らは，これまで FRP シート巻き付けによるせん断補強効果および靭性能向上効果について検討を行い，その補強効果を確認している[2)~4)]。

一方，FRP シート巻き付け工法を用いて RC 橋脚等をより効率的に耐震補強するためにはせん断および靭性補強とともに，FRP シートを縦貼りすることによって主筋段落とし部周辺を曲げ補強することも重要であり，一部で実用化されている[5]。特に FRP シートを用いて RC 梁を曲げ補強する場合には，RC 梁のシート接着面のコンクリート表面処理法や，シートによる最適な補強範囲および補強量などを決定しなければならない。しかしながら，日本コンクリート工学協会における連続繊維補強コンクリート研究委員会の報告書 (以下，報告書)[5] では，RC 梁のシート接着面における表面処理法に関する議論は行われていない。また，シートによる補強範囲および補強量などを適切に決定する方法についても触れられていない。

一方，報告書によれば，曲げとせん断を受ける RC 部材に接着した FRP シートの付着特性を評価する試験方法には，1) 中央部にノッチを入れた角柱コンクリートの両側面に FRP シートを接着させ引張試験を行う方法，2) 2つのコンクリート角柱を中央で突き合わせ，その上に FRP シートを接着させて曲げ載荷試験を行う方法，が示されている。しかしながら，1) の試験方法はせん断型もしくは純引張型の試験であり，曲げ付着特性を検討するための適切な試験方法ではないものと考えられる。また，報告書では，既往の研究より FRP シートとコンクリート面の付着強度が 2~5MPa 程度，定着長が最大でも 10cm 程度であることが報告されている。提案されている付着特性試験法の場合には，いずれもコンクリート試験体に亀裂の開口をモデル化し，あらかじめ幅 15 mm のノッチをつけた状態で試験を行い付着特性を評価している。しかしながら，実構造物の場合には補強時に全く亀裂が発生していないか (新設時)，亀裂が存在している場合でも通常 0.2mm 程度と小さいものであり，明らかに上述した付着特性試験の境界条件とは異なったものとなっている。これより，FRP シートの曲げ付着特



(mm)

図－1　試験体の概要

性を適切に評価するためには，実挙動に即した試験法の確立とその妥当性の検討が重要であるものと判断される。

本研究では，このような観点から，FRP シートを用いた RC 部材の合理的な曲げ補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として，FRP シートで曲げ補強した RC 梁による静的載荷実験を行った。これらの実験研究を効率的に行うために，実験は表面処理法に関する実験（**シリーズ1**）と，シートの種類やその厚さを変化させた場合のシートの付着特性に関する実験（**シリーズ2**）に分けて実施した。採用した FRP シートはアラミド繊維シート（以下，AFRP シート）と炭素繊維シート（以下，CFRP シート）である。また，表面処理法に関しては，実構造物への適用性を考慮して，サンダー処理とチッピング処理のみを採り上げている。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

実験は無補強の場合も含め，合計 21 体の RC 梁について行った。本研究では**まえがき**にも述べているように2つのシリーズに分けて実験を行っている。

シリーズ1では FRP シートを AFRP シートに限定し，表面処理法としてサンダーおよびチッピング処理の程度をパラメータに取って検討を行っている。**シリーズ2**では**シリーズ1**で最も有効である表面処理法を施し，シート補強材料は AFRP および CFRP を，各材料の厚さは目付け量（単位面積当りの繊維の質量：g/m^2）換算で各3種類を設定している。なお，本研究では後述のように深いチッピング処理が最も効果的であることが明かになっていることより，**シリーズ2**ではこれと同一の表面処理法を採用している。

図－1に試験体の概要を示す。本実験では，いずれのシリーズに対しても等曲げモーメント区間 50cm，せん断スパン比を 5.0 とする2点載荷とした。RC 梁はコンクリートの設計基準強度 f'_{ck} = 23.5 MPa として，せん断耐力が曲げ補強後の曲げ耐力の2倍以上を確保し，いずれの梁に対してもせん断破壊しないように断面設計を行った。実験時のコンクリートは材齢が 32 日であり，平均圧縮強度 f'_c = 24.81 MPa，弾性係数 E_c = 22.36 GPa，ポアソン比 ν_c = 0.22 である。配筋は D16(SD345) 2本を主鉄筋とする複鉄筋配置とし，スターラップとして D10 (SD295) を 15cm 間隔に配置している。また，FRP シートは梁底面の中央部 250×13cm の領域に貼り付け，シートの中心線上にはシートの付着特性を検討するために，ゲージ長 10mm のひずみゲージをシート上に 10 cm 間隔で 24 点貼り付けている。

表－1　FRP シートの公称の力学的特性値

シート名	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
AFRP シート	126.51	2.48	1.96
CFRP シート	230.46	4.07	1.77

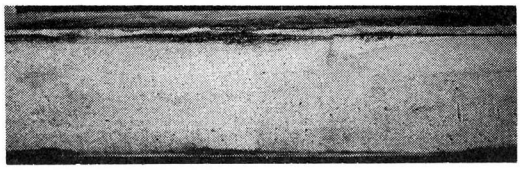
測定項目は，載荷荷重測定用のロードセル出力，シート上に貼り付けたひずみゲージ出力およびスパン中央点に設置したたわみ測定用の非接触式レーザ変位計出力である。これらの出力は最大荷重載荷時の各出力を精度良く測定するために，データレコーダに一括記録している。各データは A/D 変換を施し，各物理量に変換している。**表－1**には本研究で用いた AFRP および CFRP シートの公称の力学的特性を一覧にして示している。

2.2 試験体（シリーズ1）

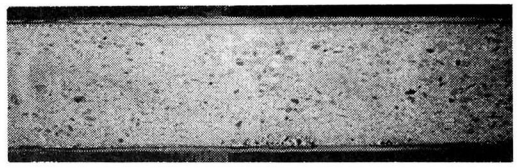
シリーズ1の実験では，**表－2**に示しているように曲げ補強材として目付け量が 415g/m^2 の AFRP シートのみを用いている。接着面の表面処理法としては，サンダー処理として表面のみを処理する浅いサンダーがけ (L-

表－２　試験体一覧

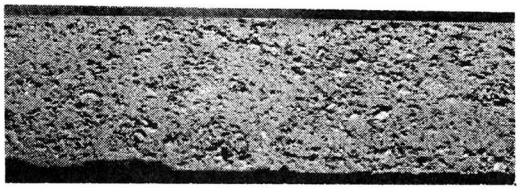
実験シリーズ	試験体名	補強材	表面処理法	シート目付け量 (g/m^2)	シート厚さ (mm)	シート軸剛性 (kN)	シート引張耐力 (kN)
1，2	N-1	なし					
	N-2						
1	L-S-1	AFRPシート	浅いサンダーがけ(表面のみ)	415	0.286	4703.6	92.2
	L-S-2						
	H-S-1		深いサンダーがけ(粗骨材露出)				
	H-S-2						
	L-C-1		浅いチッピング(処理深さ 0.5～0.9 mm)				
	L-C-2						
	H-C-1		深いチッピング(処理深さ 2.1～2.9 mm)				
	H-C-2						
2	A200-1	AFRPシート	深いチッピング(処理深さ 2.3～3.5 mm)	200	0.138	2269.6	44.5
	A200-2						
	A415			415	0.286	4703.6	92.2
	A623-1			623	0.429	7055.4	138.3
	A623-2						
	C145-1	CFRPシート		145	0.081	2426.7	43.0
	C145-2						
	C300-1			300	0.167	5003.3	88.6
	C300-2						
	C445-1			445	0.248	7430.0	131.5
	C445-2						



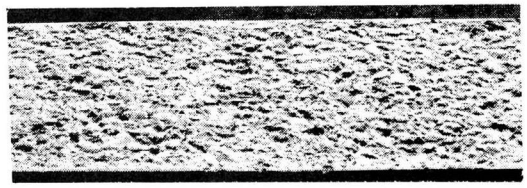
浅いサンダーがけ（L-S）



深いサンダーがけ（H-S）



浅いチッピング（L-C）



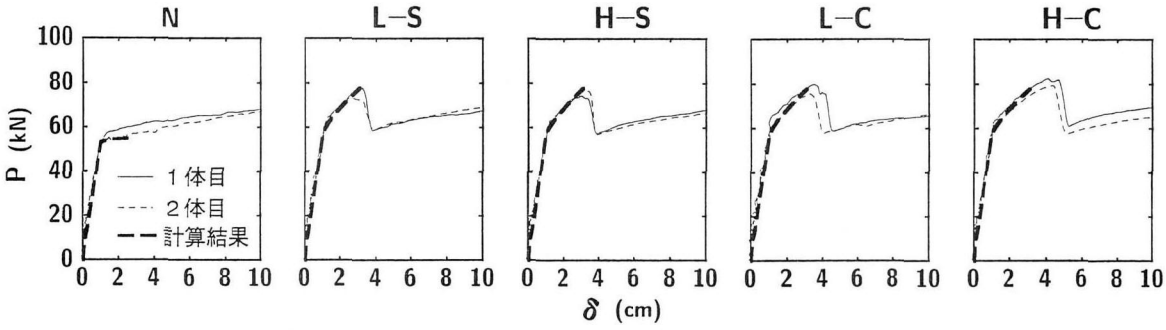
深いチッピング（H-C）

写真－１　表面処理法の状況（シリーズ１）

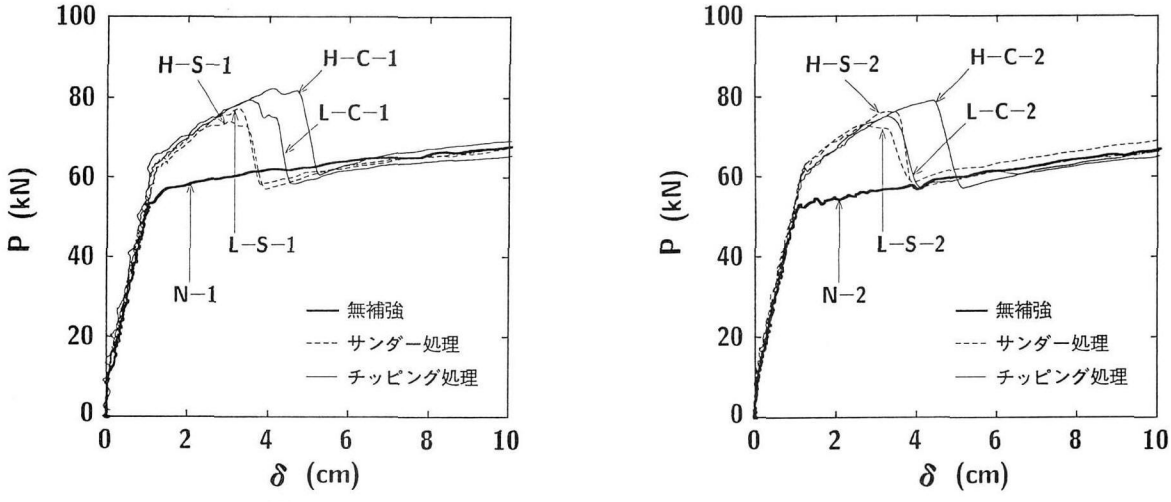
S）と，粗骨材が露出する程度に処理する深いサンダーがけ（H-S），チッピング処理として深さが 0.5～0.9mm 程度の浅いチッピング（L-C）と 2.1～2.9mm 程度の深いチッピング（H-C）の４種類を設定した。**写真－１**に各表面処理の状況を示している。なお，試験体は各ケースで実験の誤差を考慮して２体とした。また，表面処理法や FRP シート補強量による補強効果を比較検討する際の基本ケースとなる無補強試験体(N)も補強された試験体と同様に２体製作している。

2.3　試験体（シリーズ２）

シリーズ２の実験では，補強材として AFRP シートには目付け量 200, 415, 623g/m^2，CFRP シートには目付け量 145, 300, 445g/m^2 のものを用い，実験結果の比較を容易にするため両シート３種類の軸剛性および引張耐力をほぼ対応させている。**表－２**に示したように，試験体名は補強に用いたシートの頭文字と目付け量を用い



図－２　荷重－変位関係（同ケース２体および計算結果との比較）



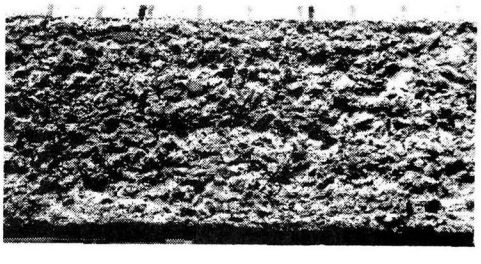
1体目　　2体目

図－３　荷重－変位関係（各実験ケースの比較）

て表すこととした。すなわち，A200，C145 はそれぞれ目付け量 200 g/m^2 の AFRP シート，目付け量 145 g/m^2 の CFRP シートにより補強した試験体を意味している。実験は A415 試験体に関してはシリーズ１における実験結果を用いることが可能であることを前提として１体のみとしているが，他のケースはいずれも２体について行った。なお，シート接着面の RC 梁の表面処理法は，シリーズ１の結果（後述）から深いチッピングが最も優れていることが明らかになっていることより，全ての梁に対して深いチッピング処理を施した。ただし，試験体が大量であることよりシリーズ１の場合より大型のチッピングマシンを用いることとしたため，シリーズ１の場合より若干深いチッピング処理となった。写真－２には，シリーズ２の梁に対するチッピング処理の状況の一例を示している。

3.　実験結果

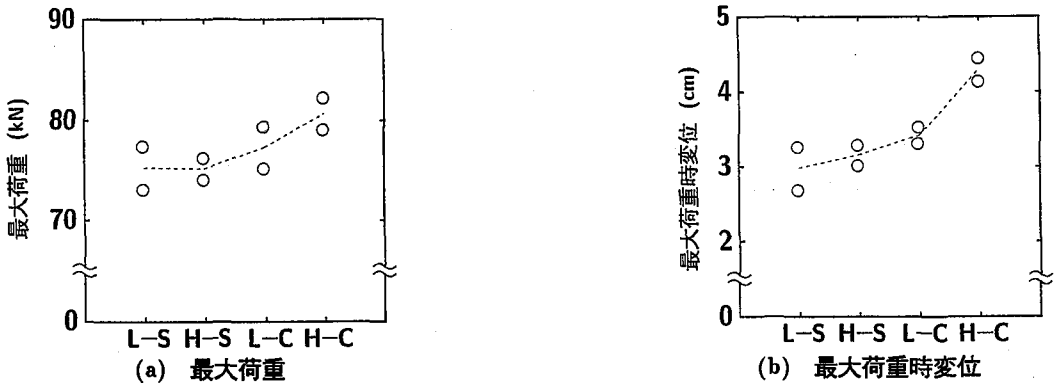
3.1　シリーズ１の実験



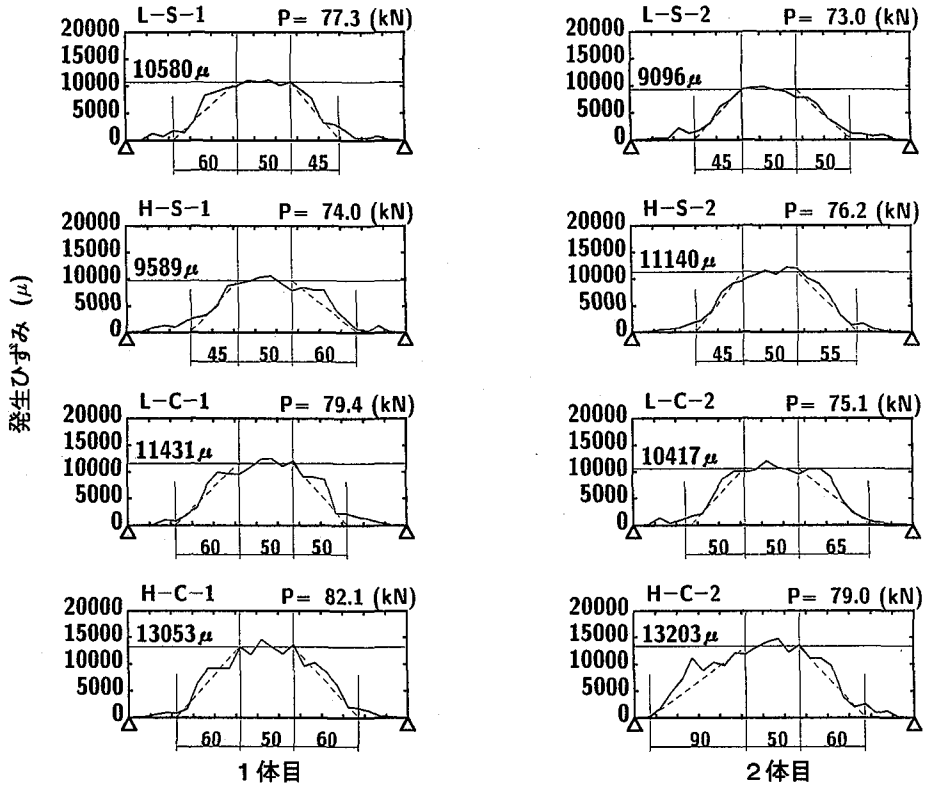
写真－２　チッピング処理の状況（シリーズ２）

(1)　荷重－変位関係

図－２には各ケース２体の荷重－変位関係を示している。図中，１体目，２体目の表記は各試験体名の末尾の数字を意味している。図より，チッピング処理の場合に若干ばらつきがみられるものの，各ケース２体の実験結果には大差はなく類似の特性を示していることがわかる。また，計算値と実測値の荷重－変位関係を比較すると，両者はほぼ最大荷重近傍まで良好に対応していることか



図－4　最大荷重および最大荷重時変位と表面処理法の関係



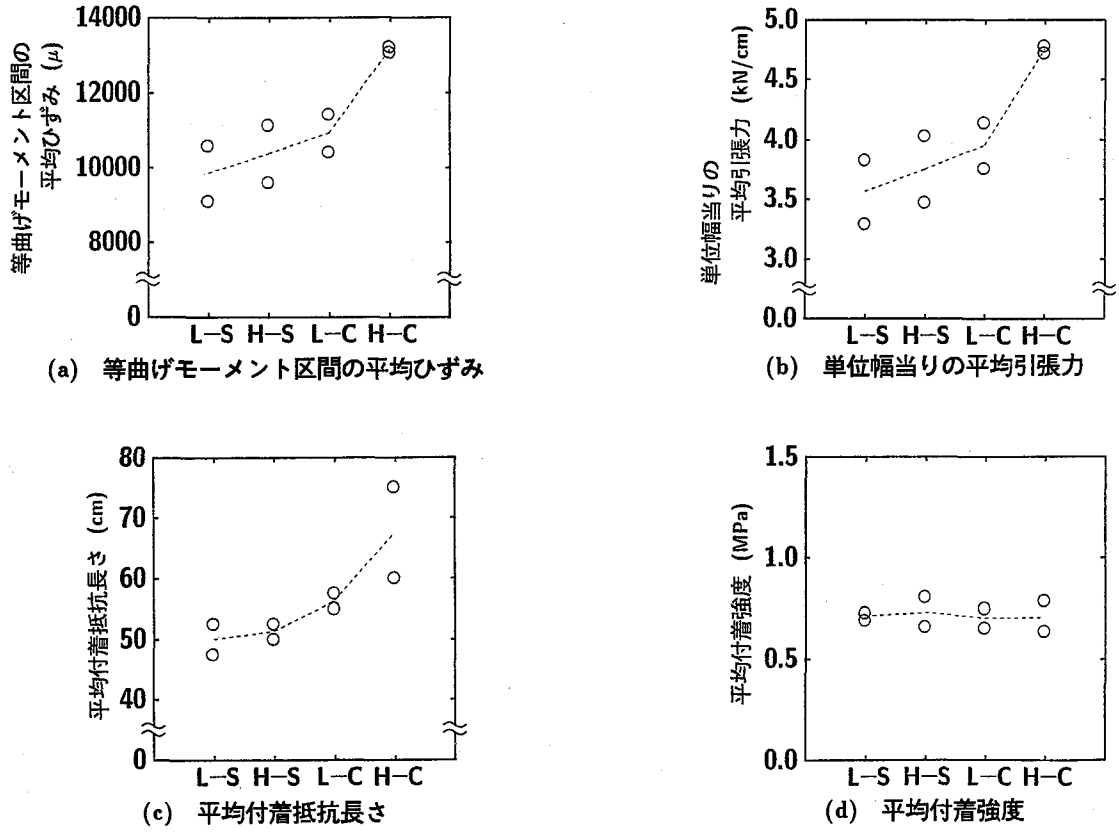
図－5　最大荷重時近傍における AFRP シートの軸方向ひずみ分布

ら，荷重が低下するまではAFRPシートとコンクリートの付着が十分に保たれていることがわかる。ここで，計算は前述したコンクリートおよび FRP シートの力学的特性を用い，鉄筋の降伏荷重を材料試験結果により0.39 GPa として断面分割法により行った。断面分割数は約5mm 間隔の 50 分割である。なお，計算は主筋降伏後，梁上縁のコンクリートひずみが 3,500μ に達した時点で破壊（梁上縁圧壊）と仮定し終了している。また，中央点変位は載荷スパンを 30 分割し曲率の線形変化を仮定して算定している。

図－3には1体目，2体目ごとの荷重－変位関係を整理している。図より，補強した全試験体の荷重は無補強の場合とは異なり，主筋降伏後もほぼ一定の第2勾配を有した状態で増加し続けており，最大荷重近傍にてシートの剥離が生じ荷重が急激に低下した後，無補強の荷重－変位関係にすりついていることがわかる。1体目に関しては，深いチッピング処理を施した試験体 (H-C-1) でシート剥離時の荷重および変位量が最大であり，次が浅いチッピング処理を施した試験体 (L-C-1) であった。一方，サンダー処理の場合は，浅いサンダー処理 (L-S-1) の方が最大荷重が若干大きいものの荷重－変位関係には両者で顕著な差は生じていない。2体目に関しては，1体目と同様に深いチッピング処理を行った試験体 (H-C-2) でシート剥離時の荷重および変位量が最大となっているが，他の試験体には大差はみられない。

(2) 最大荷重および最大荷重時変位

図－4に実験結果から求められる最大荷重と最大荷重時変位の分布を表面処理法を横軸に取って整理している。



図－6　表面処理法と AFRP シートの付着特性の関係

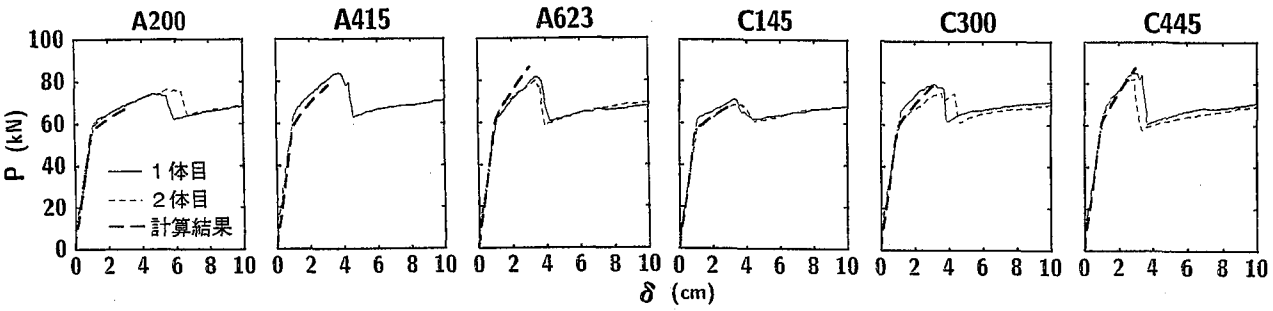
表－3　AFRP シートの付着特性

試験体名	等曲げモーメント区間の平均ひずみ (μ)	単位幅当りの平均引張力 (kN/cm)	平均付着抵抗長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)
L-S	9,838	3.56	50.0	0.71
H-S	10,364	3.75	51.3	0.73
L-C	10,924	3.95	56.3	0.70
H-C	13,128	4.75	67.5	0.70

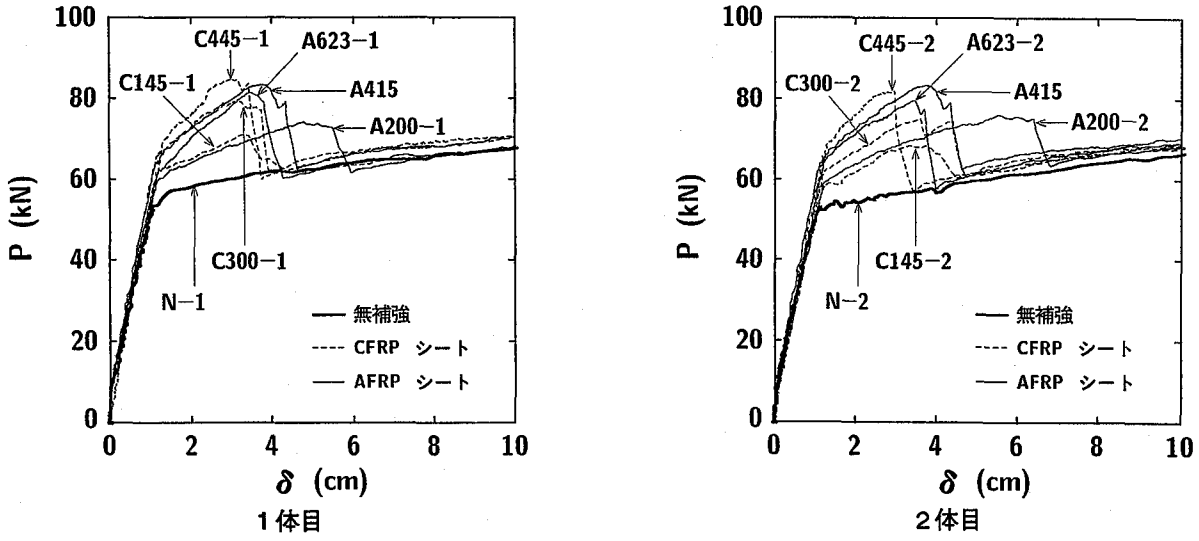
なお，図中の破線は各ケースの平均値を結んだものである。図より，最大荷重，最大荷重時変位ともに表面処理深さに対応して増加していることがわかる。 それらは，いずれも深いチッピング処理の場合 (H-C) に最も大きくなっているが，サンダー処理を行った場合は処理深さによる影響は顕著ではない。これより，本実験の範囲ではコンクリート表面とシートの付着性能を向上させるためには深いチッピング処理 (H-C) が最も有効であるものと考えられる。

(3) AFRP シートのひずみ分布

図－5には最大荷重時近傍における AFRP シートの軸方向ひずみ分布を示している。なお，図中には等曲げモーメント区間 (50cm)，等曲げモーメント区間内の6点のひずみの平均値 (以後，等曲げモーメント区間平均ひずみ) および載荷点からひずみがほぼ零に収束する位置を細線で示している。また，載荷点からひずみが零に収束する位置までの距離 (以下，付着抵抗長さ) も明記している。なお，ここで定義している付着抵抗長さとはFRPシートによる曲げ補強効果を十分に発揮するために必要な最少補強範囲であり，必要付着抵抗長さに相当するものである。図より，シートのひずみ分布は等曲げモーメント区間においてほぼ一定な値を示し，載荷点から支点に向かって徐々に減少しているのがわかる。等曲げモーメント区間のひずみがほぼ一定であるのは，この区間で曲げモーメントが一定であることに対応している。ただし，この区間におけるひずみ分布に多少の凹凸が見られるのは曲げひびわれの影響であり，同時にこの区間のシートが未だ全面剥離していないことを示している。なお，載荷点から支点までのひずみ分布が曲げモーメント勾配と対応していないのは，ひびわれの発生や主鉄筋の降伏など RC 梁の非線形挙動によるものと考えられる。以上のことから，本研究ではシートに作用する作用曲げモーメントの分担力は載荷点からシートの引張力が零になるまでの領域 (付着抵抗長さ) における付着力に



図－7　荷重－変位関係（同ケース２体および計算結果との比較）



図－8　荷重－変位関係（各実験ケースの比較）

よって抵抗しているものと考え，以下の議論を展開するものとする。この付着力は，具体的には上述の付着抵抗領域において，シートに作用する曲げ引張力差に対応するせん断応力として評価される。本論文ではこの局部的な付着応力を単にシートの付着強度と呼ぶこととする。

(4)　AFRP シートの付着特性

図－６には図－５から求められる付着特性に関する各因子についての実験結果を表面処理法を横軸に取って整理している。なお，破線は各ケースの平均値を結んだものである。図中，単位幅当りの平均引張力は，等曲げモーメント区間の平均ひずみ値に AFRP シートの公称の弾性係数を乗じて平均引張応力を求め，さらにこの値にシートの厚さを乗じたものである。また，平均付着強度は前述のとおり単位幅当りの平均引張力を平均付着抵抗長さで除したものであり，次式のように示される。すなわち，

$$\tau = \frac{\varepsilon \cdot E_f \cdot t}{l} = \frac{q}{l} \qquad (1)$$

ここで，τ：平均付着強度 (MPa)，ε：等曲げモーメント区間の平均ひずみ (μ)，E_f：FRP シートの公称の弾性係数 (MPa)，t：FRP シートの厚さ (cm)，l：平均付着抵抗長さ (cm)，q：単位幅当りの平均引張力 (kN/cm) である。

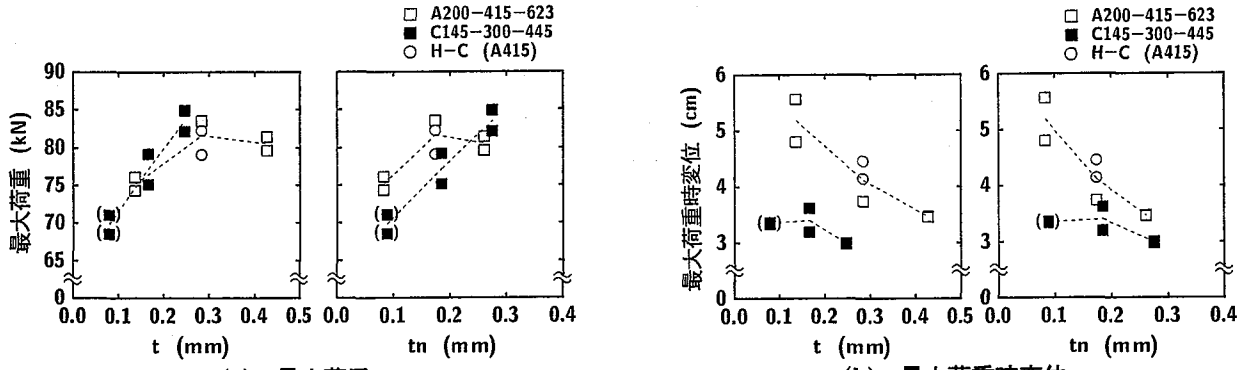
図より，等曲げモーメント区間の平均ひずみ，平均付着抵抗長さは，深いチッピング処理を施した試験体(H-C) の場合で最大となり，次が浅いチッピング処理 (L-C) の場合となっている。また，サンダー処理を施した試験体の場合には,等曲げモーメント区間の平均ひずみ，付着抵抗長さともに小さな値を示し，処理深さによる影響は顕著ではない。

一方，(d) 図より平均付着強度は表面処理法に関わらず 0.7MPa 程度に収束することがわかる。これは，(b) 図の単位幅当りの平均引張力および (c) 図の平均付着抵抗長さが表面処理法に対応して共に同様の増加傾向を示しているためと考えられる。表－３には参考のために図－６に示されている各表面処理法に対する実験結果の平均値を一覧にして示している。

3.2　シリーズ２の実験

(1)　荷重－変位関係

図－７に各ケース２体に関する荷重－変位関係の実測値と計算値を示す（無補強試験体は図－２を参照)。計算値は，実験結果に対して A200 の場合には最大荷重および最大荷重時変位とも小さな値を示している。また，



(a) 最大荷重　　(b) 最大荷重時変位

図－9　最大荷重および最大荷重時変位とシート厚さとの関係

表－4　実験結果の一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時の変位 (cm)	シート剥離(破断)時の変位 (cm)	実測第2勾配 (kN/cm)	シートの状況
N	67.3	10.00	−	1.51	−
A200	75.1	5.17	5.94	3.92	シート剥離
A415	81.5	4.10	4.33	7.35	
A623	80.4	3.45	3.76	7.65	
C145	69.6	3.34	3.58	4.56	シート破断
C300	77.1	3.39	4.07	6.03	シート剥離
C445	83.4	2.98	3.19	8.63	

A623 の場合には主鉄筋降伏後の第2勾配および最大荷重値ともに実験結果より若干大きい値となっていることがわかる。しかしながら，その他のケースに対しては，荷重－変位関係，最大荷重，最大変位とも実験結果と良く対応している。これより，断面分割法を用いることにより，大略 FRP シートで曲げ補強した RC 梁の耐力および最大変位を求めることが可能であることがわかる。また，断面分割法の仮定が最大荷重値までほぼ適用可能であることが明らかになったことより，この時点までは，等曲げモーメント区間の FRP シートと RC 梁との付着が確保され両者が一体となって挙動していると見なすことが可能であるものと考えられる。

図－8には1体目，2体目ごとの荷重－変位関係を整理している。図より，補強した RC 梁はいずれも無補強の梁とは異なり主筋降伏後も顕著に荷重が増加し，最大荷重近傍でシートが破断 (C145 のみ) もしくはシートとコンクリート面に剥離が生じて荷重が急激に低下していることがわかる。その後は，ほぼ無補強の梁の荷重－変位関係にすりついている。

最大荷重に関しては，A623 の場合を除いて，目付け量の増大とともに大きくなる傾向を示している。一方，最大荷重時の変位やシートが剥離するときの変位はシートの材料特性に関わらず，目付け量が多くなるほど小さくなる傾向にある。また，主筋降伏後の第2勾配はA623-2の場合を除いて目付け量の多い場合が大きくなっている。これらは，シートの材料特性に関わらず，目付け量を多くすることで主筋降伏後の第2勾配が大きくなるため最大荷重も大きくなる傾向にあるが，同時にシートとコンクリートの界面にはより大きなせん断力が作用するため，より小さな変位量でシートが剥離しやすくなることを示すものと考えられる。

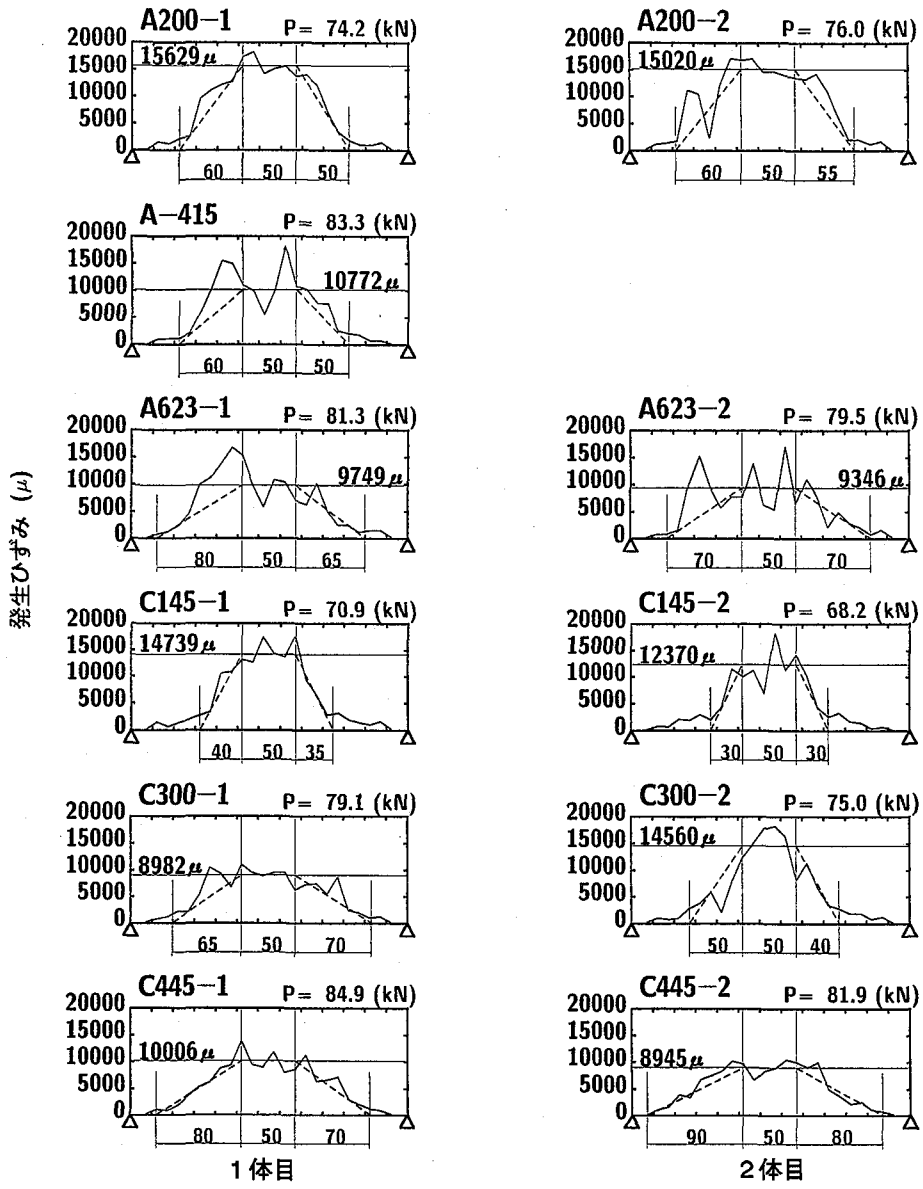
(2)　最大荷重および最大荷重時変位

図－9には全ての実験結果を用い，シート厚さと最大荷重および最大荷重時変位の関係を示している。ここで，厚さ t は各 FRP シートの実厚さであり，tn は次式のように鋼材との弾性係数比を考慮した換算厚さである。なお，鋼材の弾性係数は公称値である 205.8 GPa を用いている。

$$tn = t \times \frac{\text{FRPシートの弾性係数}}{\text{鋼材の弾性係数}} \qquad (2)$$

図中の (■) は C145 のシート破断を示し，○ は**シリーズ1**における H-C (深いチッピング) 試験体の実験結果を示している。また，図中の破線は H-C 試験体を含めた各ケースの平均値を結んだものである。また，**表－4**には参考のために，実験結果の各ケースに対する平均値を一覧にして整理している。

図－9 (a) より，シート厚さ t が 0.3mm 程度まではシートの材料特性によらず最大荷重は t の増加に対応して増加していることがわかる。しかしながら，AFRP シ

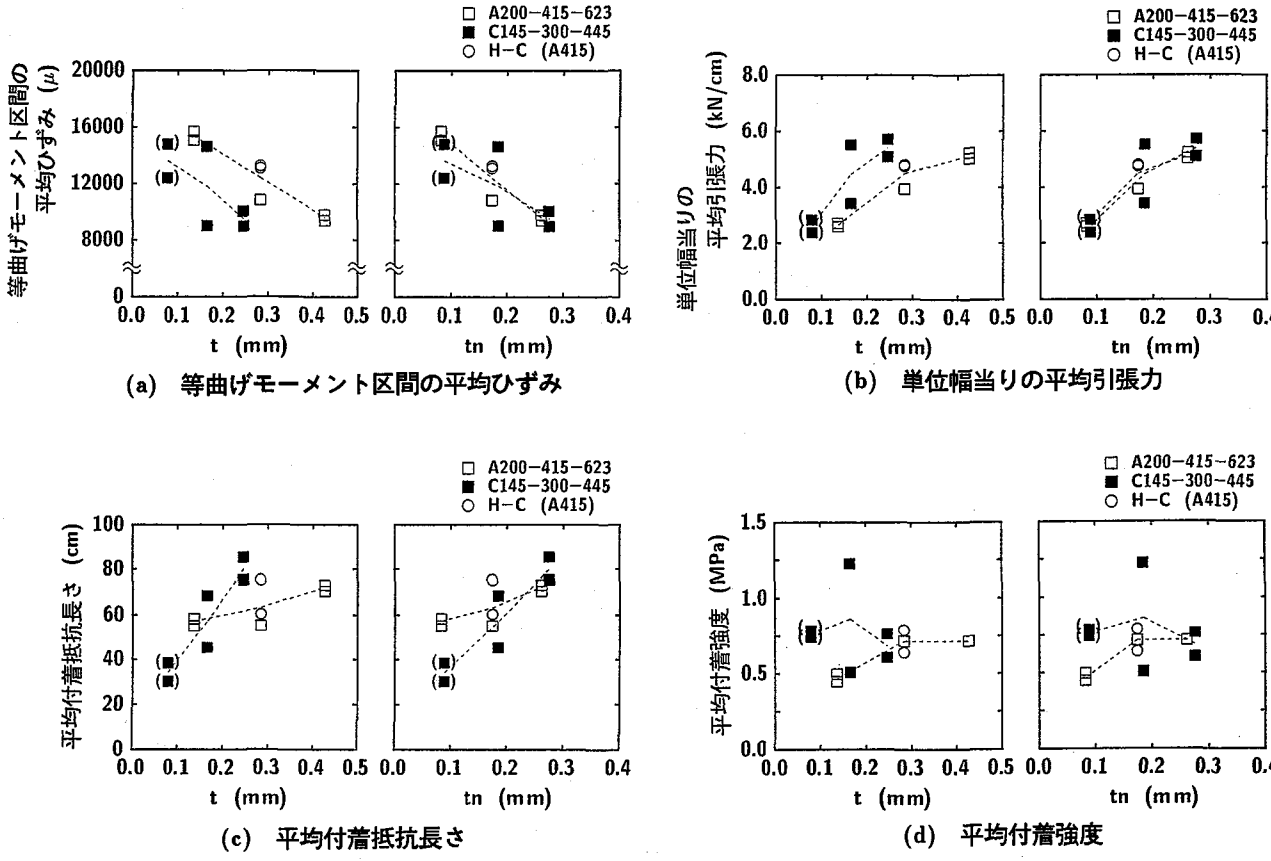


図−10　最大荷重時近傍における FRP シートの軸方向ひずみ分布

ートを用いる場合には 0.3mm 以上厚くしても最大荷重は増加していない。一方，換算厚さ tn が 0.2mm 程度まではシート材料の違いによらず tn の増加とともに最大荷重は増加し，AFRP シートの場合が CFRP シートの場合より高い補強効果を示しているものの，tn が 0.3 mm 程度では逆に CFRP シートの場合で若干効果的となっている。ただし，その差は 3 kN と小さく，両シートはほぼ同等の曲げ耐力向上効果が期待できるものと考えられる。なお，今後はさらに厚いシートを用いた実験検討が必要である。

図−9 (b) より，最大荷重時変位はシート破断の場合 (C145) を除き，シート材料に関わらずシート厚さ t の増大とともに小さくなる傾向を示していることがわかる。これは，**シリーズ1**でも述べているように，また**図−8**あるいは**表−4**の主筋降伏後の第2勾配の性状からも明らかなように，補強量の増大とともに主筋降伏後の RC 梁の剛性が増加し，かつ作用荷重も大きくなるものの，同時にシートとコンクリートの界面に大きなせん断力が作用するためと考えられる。また，シート厚さに関わらず，AFRP シートを用いる場合が CFRP シートを用いる場合よりも最大荷重時変位が大きい。この傾向は換算シート厚さ tn に対しても同様である。ただし，その差はシート厚さの増大とともに小さくなる傾向にあり，tn が 0.3 mm 程度では 0.5 cm 以下と小さい。以上のように，tn が 0.2 mm 程度以上においてはシート材料の違いに関わらずほぼ同様の曲げ耐力向上効果と変形性能が期待できるものと考えられる。

なお，CFRP シートの換算厚さ tn が 0.1mm 程度と薄い場合には，AFRP シート補強時よりも小さな荷重および変位レベルで破断に至っている。これより，CFRP シートで曲げ補強をする場合には tn を 0.2mm 程度以上にすることが望ましいものと判断される。



(a) 等曲げモーメント区間の平均ひずみ

(b) 単位幅当りの平均引張力

(c) 平均付着抵抗長さ

(d) 平均付着強度

図−11 シート材料，シート厚さと FRP シートの付着特性の関係

表−5 FRP シートの付着特性

試験体名	等曲げモーメント区間の平均ひずみ (μ)	単位幅当りの平均引張力 (kN/cm)	平均付着抵抗長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)
A200	15,325	2.62	57	0.46
A415	12,343	4.47	63	0.71
A623	9,548	5.11	72	0.71
C145	13,555	2.57	34	0.76
C300	11,771	4.44	57	0.78
C445	9,476	5.38	80	0.67

(3) FRP シートのひずみ分布

図−10 に各試験体の最大荷重時近傍におけるシートの軸方向ひずみ分布を示す。なお，図中には**シリーズ1**の場合と同様に等曲げモーメント区間における平均ひずみおよび付着抵抗長さを示している。図中のひずみ分布には凹凸が見受けられるが，これは**シリーズ1**の場合と同様，載荷荷重の増大とともに RC梁に発生した曲げひびわれによる局所的なひずみが測定されているためと考えられる。しかしながら，特性的にはいずれのひずみ分布も**シリーズ1**の場合と同様に，等曲げモーメント区間内でほぼ一様で載荷点から支点に向かって減少する傾向を示していることがわかる。

付着抵抗長さは載荷点を始点とし，ひずみがほぼ零に収束する点を結んだ直線の勾配が，実測のひずみ勾配と極力一致するように決定した。図より，C300 の場合を除いて各ケース2体のひずみ分布性状はほぼ同様であることがわかる。また，シートの材料特性によらず，目付け量の増加に対応して等曲げモーメント区間の平均ひずみは小さくなり，付着抵抗長さが増大する傾向にあることもわかる。

(4) FRP シートの付着特性

図−11には，図−10から求められる各試験体に関する平均付着抵抗長さ，等曲げモーメント区間の平均ひずみ値および**シリーズ1**と同様にして算定される等曲げモーメント区間の単位幅当りの平均引張力，平均付着強度をシート厚さ t および換算シート厚さ tn を横軸に取っ

て整理している。参考のため**シリーズ1**の H-C 試験体の値も図示している。また，図中の破線は H-C の結果を含めた各ケースの実験結果の平均値を結んだ線である。これらの平均値は，参考のため**表―5**に一覧にして整理している。

(a) 図の等曲げモーメント区間の平均ひずみはシート厚さ t が増加することでほぼ線形に低下する傾向にあり，それに対して **(b)** 図の単位幅当りの平均引張力はシート厚さ t の増加に対応して増加している。また，等曲げモーメント区間におけるシートの平均ひずみ，単位幅当りの平均引張力はともに，換算シート厚さ tn が同等の場合には，シート材料の違いに関わらずほぼ同様な分布を示していることがわかる。

(c) 図の平均付着抵抗長さは，シートの材料特性に関わらずシートの厚さ t を大きくすることにより増加することがわかる。また，tn が同程度の場合には，tn が 0.1mm 程度の場合を除きシート材料特性に関わらずほぼ同等な付着抵抗長さを示すことがわかる。

(d) 図の平均付着強度は，CFRP シートの tn が 0.2mm の場合の実験結果にばらつきが見られるものの，tn が 0.1 mm 程度と薄い A200 の場合を除き 0.7～0.8MPa に分布していることがわかる。これは，単位幅当りの平均引張力および平均付着抵抗長さがほぼ同様の増加傾向を示していることに起因しているものと考えられる。また，tn が A200 と同程度の C145 はシートの破断により実験を終了しているため，この試験体に関する平均付着抵抗長さおよび平均付着強度は他の実験結果と同等に比較できないことに留意する必要がある。

4. シートの必要付着抵抗長さと付着強度

FRP シートの曲げ付着特性に関する検討結果を，tn が 0.1mm 程度と薄い場合を除いて以下にまとめる。載荷点からの必要付着抵抗長さ（平均付着抵抗長さ）は，シートの換算厚さ tn が 0.2mm 程度の場合には 50～70 cm，tn が 0.3mm 程度の場合には 70～80cm 程度となる。その時に等曲げモーメント区間のシートに発生するひずみは 10,000～12,000μ 程度であり，シートの付着抵抗領域では 0.7～0.8MPa 程度の付着強度が期待できる。

まえがきにも述べているように，ひびわれ部をノッチによってモデル化し角柱コンクリートを用いた付着特性試験結果[5] によれば，付着強度は 2～5MPa 程度，定着長が最大でも 10cm 程度であることが報告されている。本研究結果の局部的に評価する付着強度および必要付着抵抗長さはこれらの値に対してそれぞれ 1/6～1/3，7～8 倍と大きく異なることがわかる。これは，報告書において提案されている実験方法がせん断型もしくは純引張型の付着特性を評価するものであるのに対し，本実験は直接的に RC 梁試験体を用いた曲げ荷重載荷による曲げ付着型の実験であることに起因しているものと考えられる。

なお，アラミド補強研究会の設計・施工要領（案）[6] では，AFRP シートを曲げ補強材として用いる場合のシートに発生する最大ひずみを 10,000μ に制限し，かつ，許容付着強度を 0.44MPa としている。この規定は，本実験結果の範囲内では実用的かつ安全側であると判断される。

5. まとめ

FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性を実験的に検討した。本研究では，コンクリート表面処理法を変化させた試験体の実験結果により最も効果的な表面処理法を比較検討した後，シートの材料特性および目付け量（シート厚さ）が曲げ付着特性に与える影響に着目して検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると，以下の通りである。

1) サンダー処理とチッピング処理の場合には，深いチッピング処理を施した試験体における最大荷重および最大荷重時変位が最も大きく，シートの付着性能を高めるためには深いチッピング処理が最も効果的である。
2) 鋼材の弾性係数を基準としたシートの換算厚さ tn が 0.2mm 程度以上の場合において，最大荷重，最大荷重時変位およびシートの付着特性に関しては，シートの材料特性による顕著な差は見られない。
3) シートの厚さが増加することで必要付着抵抗長さは増加し，それに対応してシートに発生するひずみは低下する。
4) シートの換算厚さ tn が 0.1mm 程度の場合，CFRP シート補強した試験体は AFRP シート補強した試験体よりも小さな荷重および変位でシート破断する可能性がある。
5) シートの換算厚さ tn が 0.2mm 程度以上の場合，シートの局部的な付着強度は表面処理法およびシートの材料特性，厚さに関わらず 0.7～0.8MPa に収束する。この時のシートの必要付着抵抗長さは 50～80cm，シートに発生するひずみは 10,000～12,000μ 程度である。

本研究結果より，FRP シートの曲げ付着特性を概略把握することができた。今後は，より厚い FRP シートを用いた場合の検討が必要である。また，FRP シートの付着特性に与える曲げモーメントの勾配や主鉄筋の降伏現象および変位曲率を変化させる斜めひびわれの影響などに着目した検討を実施する予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり，室蘭工業大学建設システム工学科松岡健一教授に適切な御指導を戴いた。また，同大学院生の新井茂雄君を始めとする大学院生に多大な御支援を戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

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) 佐藤昌志，西　弘明，三上　浩，岸　徳光：アラミドテープを巻き付けたRC橋脚模型の静的耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.1451-1456，1996.
3) 三上　浩，佐藤昌志，谷本俊充，松岡健一：アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の靭性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.1457-1462，1996.
4) 松岡健一，岸　徳光，佐藤昌志，三上　浩：水平衝撃荷重載荷による大型 RC 橋脚模型の破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.857-862，1996.
5) 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.
6) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法　設計・施工要領 (案)，1998.

(1998 年 9 月 18 日受付)