

AFRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの必要接着長評価に関する実験的研究

Experimental study on estimation of required bonding length of sheet
for flexural strengthened RC beams with AFRP sheet

岸 徳光* 三上 浩** 栗橋祐介*** 澤田純之****

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Yusuke KURIHASHI, and Sumiyuki SAWADA

* 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)

** 博(工) 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)

*** 修(工) 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)

**** 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 order to establish a rational flexural strengthening method of RC members with Fiber Reinforced Plastic (FRP) sheet, static loading tests for estimating required bonding length of FRP sheet are conducted. This study is composed of two series which are; 1) experiments for comparing the strain distribution of AFRP sheet between experimental and analytical results when the sheet is bonded onto entire lower surface of RC beam; 2) experiments for investigating the flexural bonding characteristics of FRP sheet in cases that bonding length of FRP sheet is varied. From this study, it has been found that the required bonding length at the analytical ultimate state can be obtained as the total length of main-rebar yield length at analytical ultimate state and anchoring length estimated using the nondimensional diagonally cracking capacity and section height.

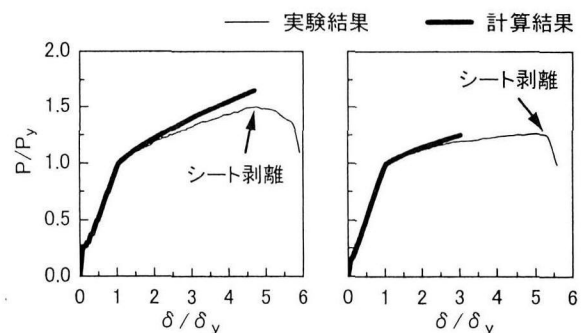
Keywords: RC beam, AFRP sheet, required bonding length, peeling action

キーワード: RC 梁, AFRP シート, 必要接着長, ピーリング作用

1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の劣化の抑制や耐震・耐荷性能の向上を目的として, 施工性に優れている連続繊維シート (以下, FRPシートもしくは単にシートと呼ぶ) 接着工法による補修・補強工事が盛んに行われている。これに対応して, 諸研究機関では, FRPシートを用いた RC 構造物の合理的かつ実用的な補強設計手法の確立を目的とした種々の実験的・解析的研究が実施されている。土木学会では, これらの研究成果をとりまとめ, FRP シートを用いた RC 構造物の合理的な補強設計手法の確立に向けた検討を行っている^{1)~4)}。

また, 著者らは, FRP シート接着工法による RC 梁の曲げ補強問題に関して, 特にシートの剥離を考慮した FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に関する実験的研究を実施してきた⁵⁾。現在までの研究では, 1) FRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は, 断面分割法による計算耐力よりも小さな荷重レベルでシートが剥離して終局に至る場合 (以下, 剥離破壊型と呼ぶ) と, 上縁コンクリートの圧壊後計算耐力と同程度の荷重レベルでシートが剥離して終局に至る場合 (以下, 曲げ圧壊型と呼ぶ) に分類されること (図-1 参照), 2) シートの剥離は, 主鉄筋降伏領域内の下縁かぶり部に形成されるコンクリートブロックがシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用 (写真-1 参照) によって生じること, 3) FRP シ



(a)剥離破壊型 (b)曲げ圧壊型
図-1 荷重-変位曲線の一例⁵⁾



写真-1 ピーリング作用による
FRP シートの剥離開始状況⁵⁾

表-1 試験体一覧

実験 シリ ーズ	試験体名	断面 形状 タイプ	軸方向 鉄筋の 呼び径	主鉄筋 比 p_t (%)	純スパン 長 l (m)	せん断 スパン比 r_s	繊維 目付量 (g/m ²)	繊維の体積 補強割合 p_f (%)	主鉄筋 降伏領域 L_{yu} ** (cm)	主定着部 接着長 αD ***
1	A2-Rn-1 ($n=3, 4, 5, 6, 7$)	A2	D16	1.26	1.8, 2.2, 2.6, 3.0, 3.4	3.1, 4.0, 5.0, 6.0, 6.9	415	1.0	18, 23, 29, 35, 42	全面接着 ⁵⁾
	A3-Rn-1 ($n=3, 5, 7$)	A3	D19	1.82	1.8, 2.6, 3.4	3.1, 5.0, 6.9	415	1.0	13, 21, 29	
	B-R7.5-1.4	B	D16	1.89	2.6	7.5	415	1.4	25	
	B-R7.5-2.8						830	2.8	30	
	*D-R5.5-0.6	D	D13	0.84	2.2	5.5	415	0.6	33	
	*D-R7.5-0.6				3.0	7.5			45	
	D-R5.5-0.6		D13	0.84	2.6	5.5	415	0.6	33	
	D-R7.5-0.6				3.4	7.5			45	
2	A2-R5-1-0	A2	D16	1.26	2.6	5.0	415	1.0	29	0
	A2-R5-1-0.5									0.5D
	A2-R5-1-1.0									1.0D
	A2-R5-1-2.0									2.0D
	A2-R7-1-0.5									0.5D
	A2-R7-1-1.0	D16	D16	1.26	3.4	6.9	415	1.0	40	1.0D
	A2-R7-1-2.0									2.0D
	A3-R5-1-0.5	A3	D19	1.82	2.6	5.0	415	1.0	21	0.5D
	A3-R5-1-1.0									1.0D
	A3-R5-1-2.0									2.0D
	A2-R5-0.5-0.5	A2	D16	1.26	2.6	5.0	200	0.5	20	0.5D
	A2-R5-0.5-1.0									1.0D
	A2-R5-0.5-2.0									2.0D

*: スパン中央部1点載荷により実験を実施, **: 等せん断力区間における計算終局時の値, ***: D は梁高を意味する.

ート曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、圧壊を想定した計算終局時における等せん断力区間の主鉄筋降伏領域 L_{yu} のせん断スパン長 a に対する割合を基に予測可能であること、を明らかにしている。しかしながら、これらの研究成果は、いずれもシートを両支点間のほぼ全面に接着（以後、全面接着と呼ぶ）して実施した実験結果に基づいて得られたものである。FRP シートを用いた RC 梁の合理的な曲げ補強設計手法を確立するためには、さらにシートの必要接着長の算定手法を確立する必要がある。

このような観点より、本研究では、曲げ圧壊型の FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として、全面接着する場合と同程度の耐荷性能を保持するためのシートの必要接着長に関する検討を行うことを目的に、全面接着を基本にしてシートの接着長を種々変化させた静載荷実験を行った。本研究では、まず著者らが過去に実施した全面接着の場合の実験結果に基づき、計算終局時における主鉄

筋降伏領域を主曲げ補強領域、主鉄筋降伏先端部からシート端部までの領域を主定着領域と考え、主定着領域のシートひずみの挙動特性について検討を行った。次に、それらの検討結果を基に、主定着領域のシート接着長（以後、主定着部接着長）を種々変化させた実験を行い、全面接着とする場合の計算耐力や変形能との比較検討を行っている。なお、本実験では、著者らによる過去の実験研究との整合性を考慮して、FRP シートには全てアラミド繊維製 FRP（以後、AFRP と呼ぶ）シートを用いることとした。

2. 実験概要

表-1 には、本研究に用いた試験体を一覧にして示している。シリーズ1は、シートを全面接着した場合に曲げ圧壊型となる全14体の試験体を著者らによる既往の

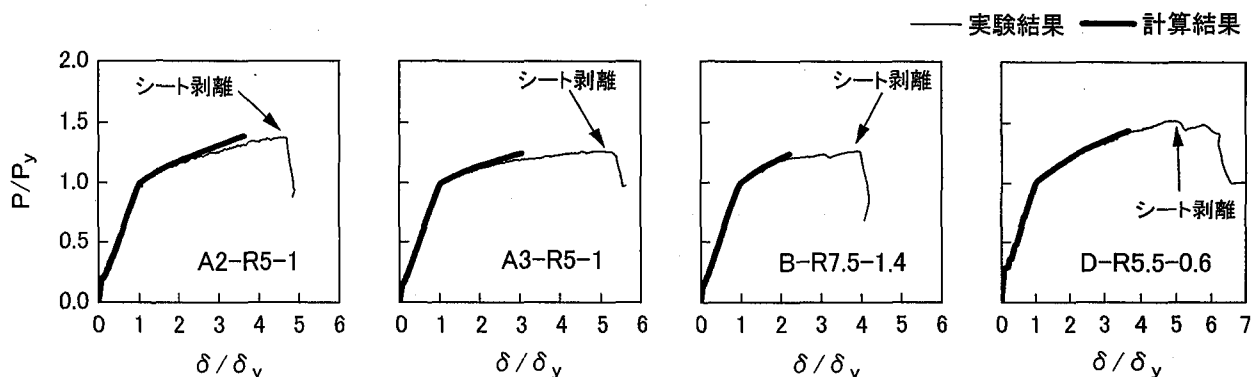


図-4 無次元荷重-変位関係の一例(シート全面接着の場合)⁵⁾

表-2 コンクリートの力学的特性値

材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
40	23.9	20.9	0.203

表-3 鉄筋の力学的特性値

材質記号	SD295	SD345	
呼び径	D10	D16	D19
降伏強度 (MPa)	382	386	389
弾性係数 (GPa)	206		

表-4 AFRP シートの力学的特性値

目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
200	0.138	131	2.48	1.89
415	0.286			

耐力は FRP シートの剛性を無視しコンクリート標準示方書⁶⁾(以下、単に示方書)に準拠して算出している。

図-3 には、A2-R5-1(-α) 梁を例に試験体底面のシートの接着状況を示している。本実験では、シート接着領域にショットブラスト処理(処理深さ 1~2 mm)を施してシートの付着性能を向上させている。シート材料には、繊維目付量 200 もしくは 415 g/m² の AFRP シートを用い、設定補強量に応じて 1 層もしくは 2 層貼り付けることとしている。シリーズ 1 の場合のシート接着長は、梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲としている。なお、シート幅は A2, A3 および B 梁の場合は 130 mm, D 梁の場合は 80 mm である。シリーズ 2 の場合の接着長は、等曲げ区間から計算終局時の主鉄筋降伏領域 L_{yu} までの主曲げ補強部を基本長さとし、その両支点側に主定着部接着長を設定して、梁高 D の α ($=0, 0.5, 1.0, 2.0$) 倍に変化させている。なお、シート

上には検長 10 mm の箔ひずみゲージを梁中央部より 100 mm 間隔および載荷点直下に貼付けている。

表-2, 3 および 4 には、それぞれシリーズ 2 の実験時に実施したコンクリート、鉄筋および AFRP シートの材料試験より得られた力学的特性値の一覧を示している。なお、シリーズ 1 の実験に関する各材料の力学的特性値については文献 5) を参照されたい。本実験の測定項目は、載荷荷重測定用のロードセル出力、シートに貼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非接触式レーザ変位計出力である。これらの各出力データは、アンプ内蔵のデジタルメモリレコーダによりサンプリング周波数 10 Hz で一括収録している。

3. 実験結果

3.1 シリーズ 1 の実験結果

(1) 荷重-変位関係

図-4 には、AFRP シートを全面接着した場合における荷重-変位関係の実験結果と断面分割法による計算結果との比較図を文献 5) より一部抜粋して示している。ここで、計算結果は、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示方書⁶⁾に基づいて設定し、AFRP シートが破断に至るまで完全弾性体であるものと仮定して算出している。また、シートは計算終局時までコンクリート面と完全付着状態にあるものと仮定し、上縁コンクリート歪が 3,500 μ に到達した時点で計算を終了している。その他の計算過程に関する詳細は、文献 5) に譲ることとする。なお、実験および計算結果は、共にそれぞれの主鉄筋降伏時の荷重値 P_y および変位値 δ_y で除し無次元化して示している。また、文献 5) では、いずれの試験体においても実験結果の降伏荷重 P_{yc} 、降伏変位 δ_{yc} が、計算結果のそれら P_{yc} 、 δ_{yc} を上回っていることを確認している。

図より、本研究において対象としている AFRP シート曲げ補強 RC 梁は全て曲げ圧壊型であることから、これらの実験結果は、計算終局変位を上回った後計算終局荷重と同程度の荷重レベルでシート剥離が生じ終局に至

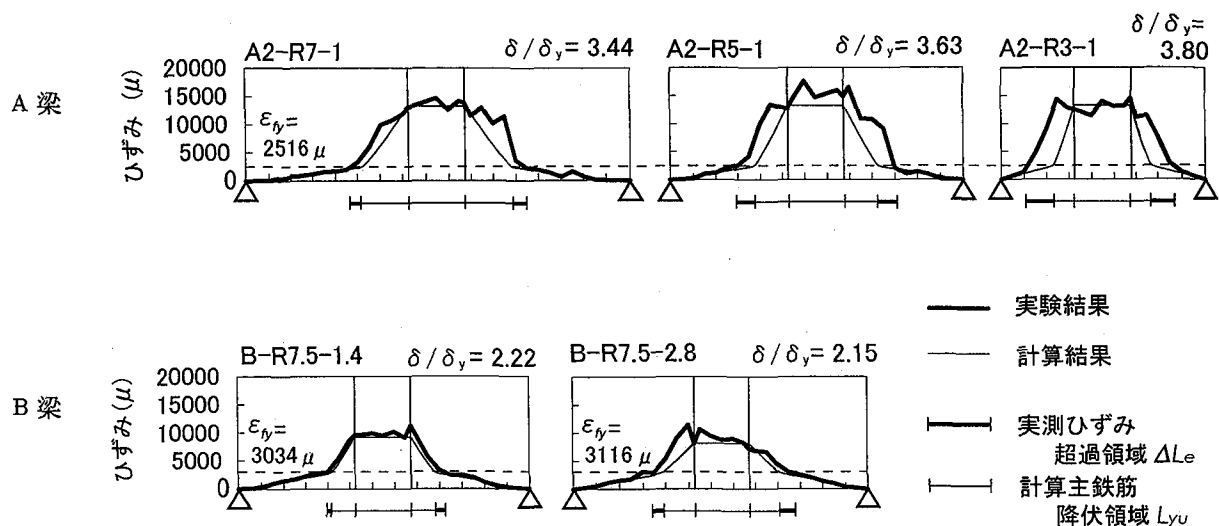


図-5 計算終局時における AFRP シートの軸方向ひずみ分布の一例 (シート全面接着の場合)

っていることが分かる。なお、実験結果は、計算終局時に到達後顕著な荷重増加を示さない傾向にある。これは、1) 計算終局時に、上縁コンクリートが圧壊し始め、2) 同時に載荷点近傍での曲率増加が顕著となり、3) 作用せん断力の影響も相まって下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックのシートを押し下げるピーリング作用が顕在化し、4) シートの部分剝離が進展するためと推察される。

(2) AFRP シートの軸方向ひずみ分布

図-5には、計算終局変位時における AFRP シートの軸方向ひずみ分布の実験および計算結果の比較図の一例として、3体の A 梁 (A2-R7/R5/R3-1) および2体の B 梁 (B-R7.5-1.4/2.8) の結果について示している。なお、計算結果は、前述の断面分割法に基づいて算出したものである。各ひずみ分布図の下には、計算主鉄筋降伏領域を細線で示し、主定着領域において実験結果のシートひずみが計算による主鉄筋降伏先端部のひずみ ε_{fy} よりも大きく示される領域を実測ひずみ超過領域 ΔL_e と定義し、太線で示している。

図より、等曲げ区間における実験結果のひずみ分布は、A2-R5-1試験体の場合で多少大きく示されているものの、いずれの試験体の場合も上縁コンクリートの圧壊を想定した計算結果と大略対応していることが分かる。従って、等曲げ区間における AFRP シートは、断面分割法における計算仮定と同程度の引張力を分担しているものと判断される。一方、等せん断力区間における実験結果のひずみ分布は、計算結果よりも大きく示され、局所的に等曲げ区間と同程度かそれ以上のひずみが発生している試験体も見受けられる。これは、前述したピーリング作用により、シートがコンクリートブロックによって下方に押し下げられ、シートに計算仮定よりも大きな引張力が生じることによるものと推察される。しかしながら、シートはこのようにピーリング作用を受けて剝離の傾向を

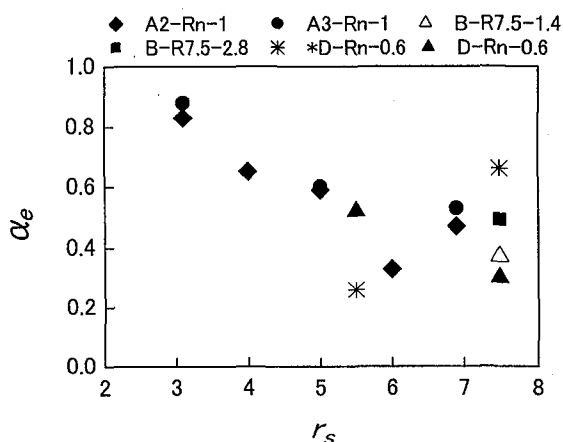


図-6 α_s と r_s との関係

示すことから、RC 梁に対して局部的に勾配を持って作用しているものと考えられる。従って、シートは RC 梁に対して曲げによる水平引張力成分のみならず鉛直力成分も分担することとなる。これより、前述の大きな引張力が全て曲げ補強に寄与するものでないことは明らかである。なお、等せん断力区間において、実験結果のひずみ値が計算結果よりも大きく示される傾向は、A 梁に関する実験結果からせん断スパン比 r_s が小さい場合ほど、また B 梁に関する実験結果からシートの体積補強割合 p_f が大きい場合ほど顕著であることが分かる。これらの性状は実測ひずみ超過領域 ΔL_e の拡大傾向とも良く対応している。

ΔL_e の発生は、前述のようにコンクリートブロックのピーリング作用によって、計算終局時には計算主鉄筋降伏領域 L_{yu} から主定着領域の ΔL_e までシートが乱されていることによるものと考えられる。これはシートの定着長として最低 ΔL_e だけは確保しなければならないことを意味しており、 ΔL_e の評価が定着長を決定する上

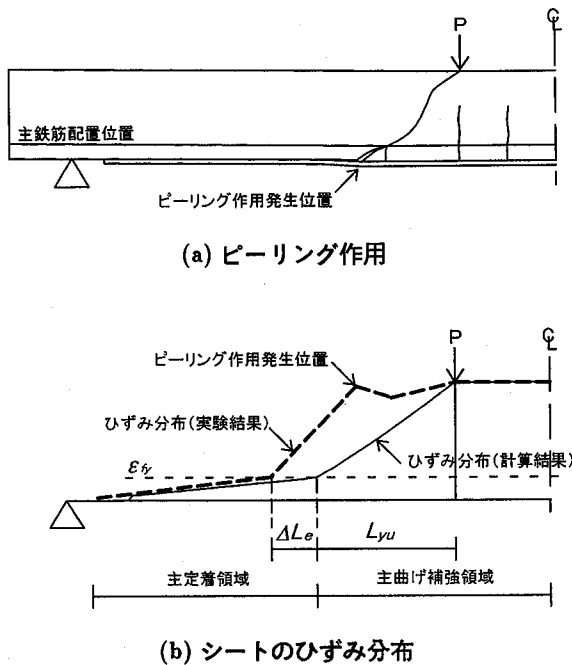


図-7 シートのひずみ分布性状に関する概念図

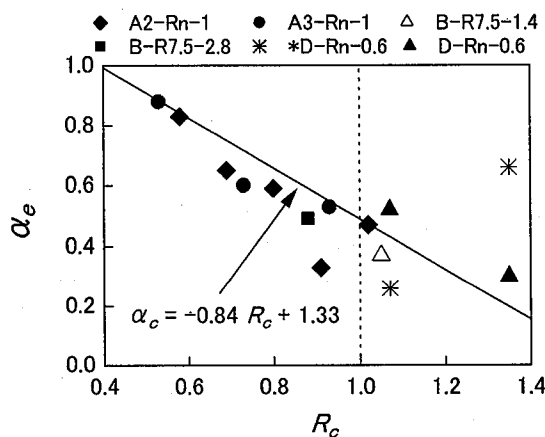


図-8 α_e と R_e との関係

で重要な要素であるものと推察される。これより、次項では ΔL_e の分布性状や ΔL_e への影響因子、評価法について検討を行うこととする。

(3) 主定着領域におけるシートのひずみ分布特性

本項では、主定着領域におけるシートひずみの挙動特性を把握するため、前述の実測ひずみ超過領域 ΔL_e に着目した検討を行う。前述のように、 ΔL_e はせん断スパン比 r_s が小さいほど大きくなる傾向を示していることより、まず ΔL_e と r_s の相関性について検討する。

図-6には、 ΔL_e を梁高 D で除した無次元実測ひずみ超過領域 $\alpha_e (= \Delta L_e / D)$ と r_s の関係を示している。図より、 $3 < r_s < 6$ の場合には r_s が大きいほど α_e が小さくなるものの、 $r_s > 6$ ではこの相関性が見られないことが分かる。これより、せん断スパン比 r_s が6程度以上の場合には、他の要因が介在しているものと推察され

表-5 ひずみ超過領域の検討に用いた結果の一覧

試験体名	r_s	R_e	α_e	α_e
A2-R3-1	3.1	0.58	0.83	0.84
A2-R4-1	4.0	0.69	0.65	0.75
A2-R5-1	5.0	0.80	0.59	0.66
A2-R6-1	6.0	0.91	0.33	0.57
A2-R7-1	6.9	1.02	0.47	0.47
A3-R3-1	3.1	0.53	0.88	0.88
A3-R5-1	5.0	0.73	0.60	0.72
A3-R7-1	6.9	0.93	0.53	0.55
B-R7.5-1.4	7.5	1.05	0.37	0.45
B-R7.5-2.8	7.5	0.88	0.49	0.59
*D-R5.5-0.6	5.5	1.07	0.52	0.43
*D-R7.5-0.6	7.5	1.35	0.30	0.20
D-R5.5-0.6	5.5	1.07	0.26	0.43
D-R7.5-0.6	7.5	1.35	0.66	0.20

る。なお、 α_e の最大値および最小値は、それぞれ 0.9、0.25 程度である。

また、図-7のシートのひずみ分布に関する概念図のように、実測ひずみ超過領域 ΔL_e は、かぶり部に形成されるコンクリートブロックがシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用にも関連するものと考えられる。これより、以下ではコンクリートブロック形成の元となる斜めひび割れ発生荷重との関連性について検討を行うこととする。すなわち、 ΔL_e と計算斜めひび割れ発生荷重 V_e の計算終局曲げ耐力 P_{uc} に対する比である無次元計算斜めひび割れ発生荷重 (以後、単に無次元斜めひび割れ荷重) R_e との相関性に関する検討である。なお、 P_{uc} は前述の断面分割法により算出し、 V_e はせん断補強筋を有しない RC 梁のせん断耐力として文献7) の提案式により算出した。

図-8には、無次元実測ひずみ超過領域 α_e と無次元斜めひび割れ荷重 R_e の関係を示している。なお、計算上、 $R_e \leq 1.0$ の場合には計算終局時到達前に斜めひび割れが発生することを意味し、 $R_e > 1.0$ の場合には計算終局時においても斜めひび割れが生じないことを意味している。図より、 R_e が大きいほど α_e が小さく示されており、図-6に示した α_e と r_s との関係よりも高い相関性を示していることが分かる。これは、斜めひび割れ発生荷重 V_e の計算曲げ耐力 P_{uc} に対する割合が小さいほど、低い荷重レベルで下縁かぶり部に斜めひび割れが発生し、その結果ピーリング作用も早期に発生するため、結果として ΔL_e も大きくなるためと推察される。なお、 $R_e > 0.8$ の領域において結果に多少ばらつきが見られるのは、1) $R_e > 0.8$ の場合における実測ひずみ超過領域 ΔL_e が、7 ~ 15 cm 程度であるのに対して、シートひずみの測定間隔が 10 cm であること、2) ショ

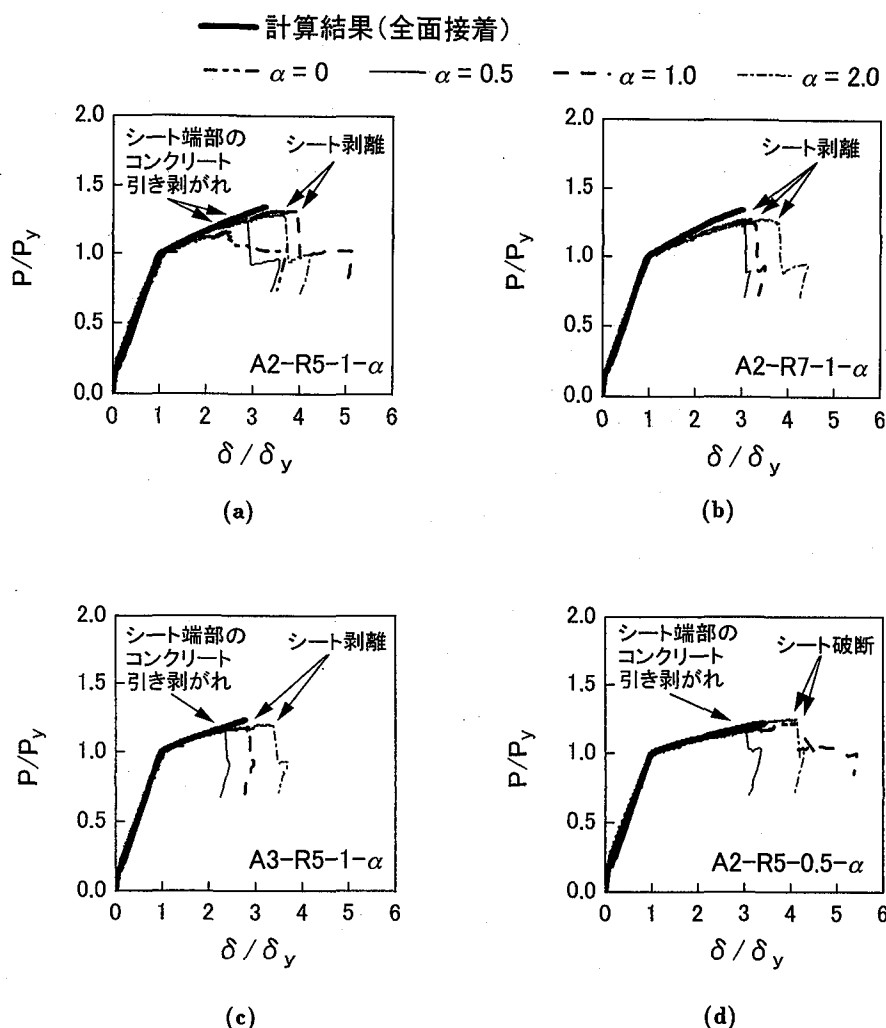


図-9 無次元荷重-変位関係(シートの接着長を変化させた場合)

ットブラスト処理によるコンクリート表面の凹凸やひび割れの発生により、局所的に ε_{fy} 以上のひずみが発生する場合があること、等が影響しているためと推察される。ここで、 $R_c \leq 1.0$ を対象とした α_c 値の上限式を求めると、式(1)のように示される。すなわち、

$$\alpha_c = -0.84 R_c + 1.33 \quad (1)$$

なお、本研究では上式より得られる α_c の上限値を実験結果の α_c と区別するため、無次元ひずみ超過領域 α_c として取り扱うこととする。

以上より、 ΔL_c は、斜めひび割れ発生荷重との相関が強く、 α_c は、 R_c を用いて大略評価可能であることが明らかになった。表-5には、参考のため r_s 、 R_c 、 α_c および式(1)より得られる α_c の一覧を示している。

3.2 シリーズ2の実験結果

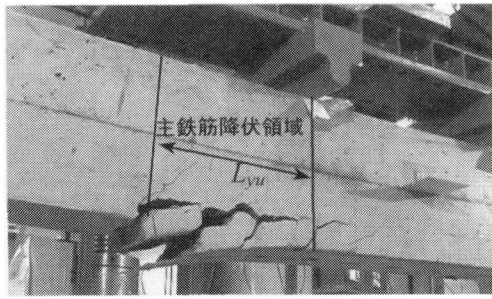
本節では、FRPシート曲げ補強RC梁が全面接着の場合と同程度の耐荷性能を保持するためのシートの必要接着長を検討するために、主定着部接着長 αD を種々変化させた実験結果について検討を行う。なお、 α は、全面接着時における α_c が $0.25 \sim 0.9$ 程度であったこと

から、本節の実験では α を $0, 0.5, 1.0, 2.0$ と設定している。

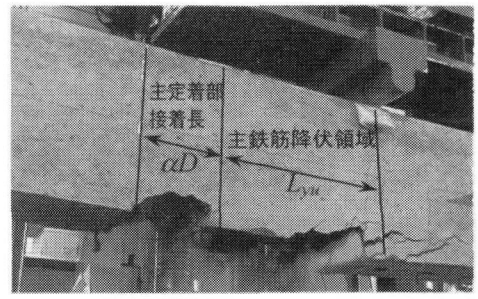
(1) 荷重-変位関係

図-9には、各RC梁の荷重-変位曲線の実験結果を断面分割法による計算結果と比較して示している。 $\alpha = 0.5, 1.0, 2.0$ の場合の計算結果は、いずれも全面接着の場合と同様であることより、シートを全面接着する場合の計算結果を示している。一方、 $\alpha = 0$ の場合の計算結果は、シートの接着長不足のため全面接着時の計算終局耐力および変位を下回る結果となっているが、図が煩雑になるため、ここでは省略している。実験結果および計算結果の荷重、変位は、図-4と同様、各々の主鉄筋降伏時の荷重値および変位値を用いて無次元化して整理している。

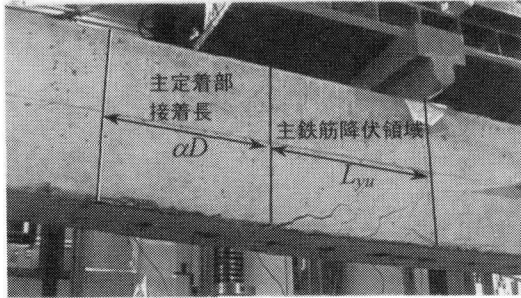
(a) 図の A2-R5-1- α 梁に関して考察すると、この場合の無次元ひずみ超過領域 α_c は表-5より 0.66 として与えられる。図より、 α が 0.66 よりも小さい $0, 0.5$ の場合には計算終局点に到達する前にシート端部のコンクリートが引き剥がれて終局に至っていることが分かる。一方、 $\alpha \geq 1.0$ の場合には、 $\alpha = 1.0$ の場合に $\alpha = 2.0$ の場合よりも変形性能が向上しているものの、いずれの場



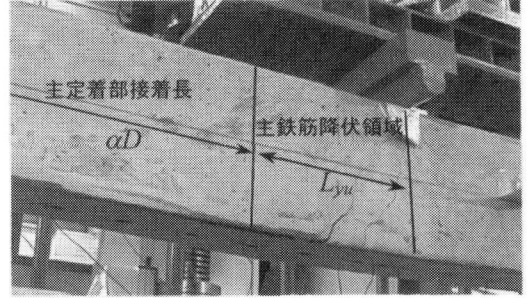
(a) $\alpha = 0.0$



(b) $\alpha = 0.5$



(c) $\alpha = 1.0$



(d) $\alpha = 2.0$

写真-2 終局時におけるシートの剥離状況 (A2-R5-1- α 試験体, $\alpha_c = 0.66$)

合も計算終局点に到達後終局に至っていることが分かる。

(b) 図の A2-R7-1- α 梁に関しては、 α_c は表-5 より、0.47 として示されている。図より、 $\alpha = 0.5$ の場合がほぼ計算終局点で終局に至っており、 $\alpha \geq 1.0$ の場合には、計算終局点よりも大きい変形状態で終局に至っていることが分かる。

(c) 図の A3-R5-1- α 梁に関しては、 $\alpha_c = 0.72$ として評価される。図より、 $\alpha = 0.5$ の場合にはシート端部のコンクリートが引き剥がされ、計算終局前に終局に至っていることが分かる。一方、 $\alpha \geq 1.0$ の場合には計算終局状態に到達後にシートが剥離して終局に至っている。

(d) 図より、A2-R5-0.5- α 梁の場合には、式 (1) から求められる α_c は 0.54 として求められる。図より、 $\alpha = 0.5$ の場合には、上述の無次元ひずみ超過領域 $\alpha_c = 0.54$ よりも小さく、計算終局点到達前にシート端部のコンクリートの引き剥がれによって終局に至っている。一方、 $\alpha \geq 1.0$ の場合には計算終局点に到達後にシートの破断によって終局に至っている。

以上より、 α が式 (1) で評価される全面接着時の無次元ひずみ超過領域 α_c よりも小さい場合にはシート端部のコンクリートの引き剥がれあるいはシートの剥離によって終局に至るものの、 α_c より大きい場合には計算終局点に到達後、終局に至ることが明らかになった。

(2) 破壊性状

写真-2 には、図-9(a) に対応した A2-R5-1- α 梁に関する終局時のシートの剥離性状を各主定着部接着長

αD に対して示している。なお、A2-R5-1- α 梁の無次元ひずみ超過領域 α_c は 0.66 である。

$\alpha = 0$ の場合は、シート接着端部の下縁かぶりコンクリート部に発生した曲げひび割れと主鉄筋に沿う割裂ひび割れによってかぶりコンクリートがブロック化し、シートがコンクリートに接着した状態で引き剥がれている。 $\alpha = 0.5$ の場合には、シート接着端部から斜め上方に向かって発生したひび割れが主鉄筋に沿って梁中央部方向に進展した後、シートのピーリング作用によって主定着領域のかぶりコンクリートが瞬間的にシートとともに引き剥がされている。

このように、 α が α_c よりも小さい場合には、シート端部のかぶりコンクリートがシートのピーリング作用によって激しく損傷し、耐力、変形能ともに計算結果を下回る状態で終局に至っている。このような破壊性状は、A3-R5-1-0.5、A2-R5-0.5-0.5 試験体の場合にも同様に見られることを確認している。

$\alpha = 1.0, 2.0$ の場合には、 α が α_c よりも大きい場合であるが、全面接着の場合と同様に、主鉄筋降伏領域 L_{yu} 内の下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れが曲げひび割れと交差してコンクリートブロックが徐々に形成され、この部分がシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用によって計算終局点に到達後シートが剥離し終局に至っている。これは、計算終局時において主定着領域にコンクリートブロックによるピーリング作用が顕在化した後も α が α_c を上回っているた

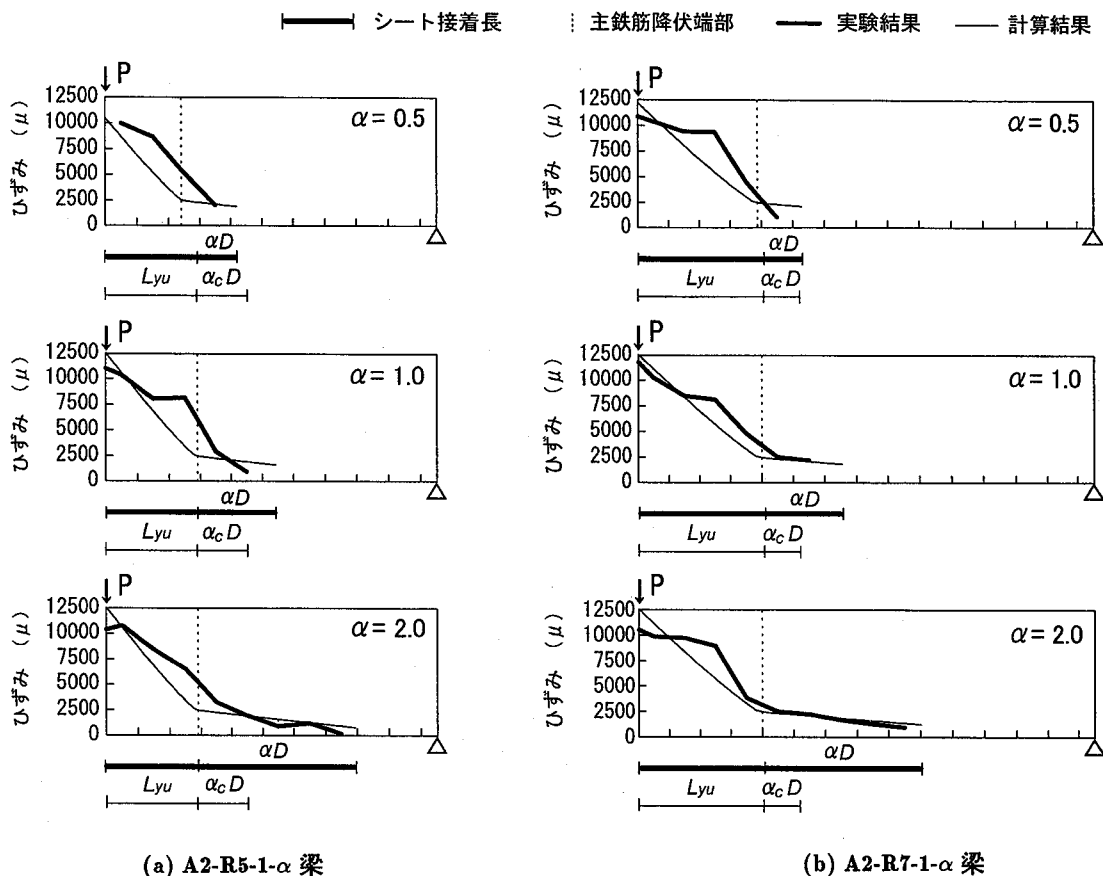


図-10 右側等せん断力区間におけるシートの軸方向ひずみ分布の実験結果および計算結果の比較図

め、シートの全面的な剝離および下縁かぶりコンクリートの著しい損傷が生じないことによるものと推察される。

このような性状は、A2-R5-1- α 梁よりもせん断スパン比 r_s の大きい A2-R7-1- α 梁および主鉄筋比 p_t の大きい A3-R5-1- α 梁の場合においても同様に確認された。なお、A2-R7-1- α 梁は、 $\alpha = 0.5$ の場合においてもピーリング作用によるシート剝離を示している。また、繊維目付量の小さい A2-R5-0.5- α 梁は、 $\alpha = 1.0, 2.0$ の場合にはシートの破断により終局に至った。これらの試験体は、いずれも α が α_c を上回っており、計算結果と同程度の耐荷性能を示している。

(3) 等せん断力区間のひずみ分布性状

ここでは、シートの接着長を変化させた場合におけるシートのひずみ分布性状を無次元ひずみ超過領域 α_c と対比させて詳細に検討を行う。図-10には、せん断スパン比 r_s の異なる A2-R5-1- α および A2-R7-1- α 梁の右側等せん断力区間を対象として、 $\alpha = 0.5, 1.0, 2.0$ とする場合の計算終局時の実験結果を計算結果と比較して示している。ただし、 $\alpha = 0.5$ の場合については実験終局時の結果を示している。なお、各ひずみ分布図の下には、シート接着範囲を太線で、計算主鉄筋降伏領域 L_{yu} 、計算ひずみ超過領域 $\alpha_c D$ を細線で示している。

図より、 $\alpha = 0.5$ の場合は、A2-R5-1-0.5, A2-R7-1-0.5 試験体ともに計算終局変位に到達する前に終局に至って

いるため、主鉄筋降伏先端部が L_{yu} の端部よりも載荷点側に位置していることが分かる。ただし、A2-R7-1-0.5 試験体の場合には、計算終局変位を若干下回る状態で終局に至っているため、主鉄筋降伏先端部は L_{yu} の端部とほぼ同位置に示されている。一方、 $\alpha = 1.0, 2.0$ の場合には、実験結果が計算終局変位に到達しているため、A2-R5-1- α , A2-R7-1- α 梁ともに主鉄筋降伏先端部は L_{yu} の端部に位置している。

各試験体のひずみ分布性状を見ると、いずれの試験体においても実験結果が計算結果を上回る傾向にあり、コンクリートブロックのピーリング作用によってシートが下方に押し出されている状況が伺える。また、A2-R5-1-0.5 試験体の結果を見ると、ひずみがシート接着端部に向かって直線的に低下していることが分かる。これは、A2-R5-1-0.5 試験体の主定着部接着長 αD が計算ひずみ超過領域 $\alpha_c D$ よりも小さいためにシートの接着長が不十分であり、計算終局点到達前にシートの接着端部近傍においてもピーリング作用に起因する大きなひずみが発生するためと考えられる。このような分布性状は、 α が無次元ひずみ超過領域 α_c よりも小さい A3-R5-1-0.5, A2-R5-0.5-0.5 試験体の場合にも同様に見られた。

一方、A2-R7-1-0.5 試験体のシート接着端部近傍のひずみ分布は、A2-R5-1-0.5 試験体と同様の性状を示しているものの、シート接着端部のひずみ値は、1,000 μ 程度

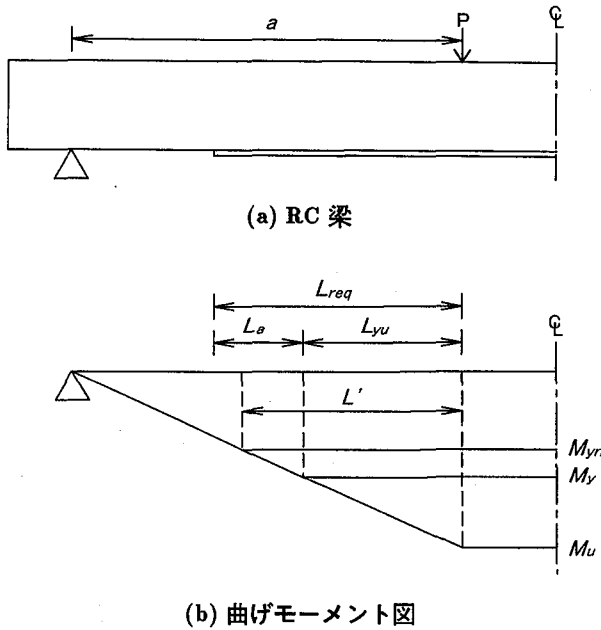


図-11 必要接着長に関する概念図

と小さく、定着の傾向を示している。また、A2-R5/R7-1- α 梁のうち $\alpha = 1.0, 2.0$ の場合の実験結果は、シートの端部に向かって直線的には低下せず、主定着領域のシート接着部に大ひずみを発生しない領域が確認できる。これより、A2-R7-1 梁の全ケースおよび A2-R5-1 梁の $\alpha = 1.0, 2.0$ の場合には、 αD が $\alpha_c D$ よりも大きく、主定着領域のシートがコンクリートブロックのピーリング作用力やそれに起因するシートの発生引張力およびシートのピーリング作用による接着端部のコンクリートの引き剥がれ現象に対して十分な定着性能を発揮していることが分かる。このような性状は、 α が α_c よりも大きく計算結果と同程度の耐荷性能を有する A3-R5-1-1.0/2.0, A2-R5-0.5-1.0/2.0 試験体の場合においても同様であることを確認している。

4. シートの必要接着長算定法

3.2 節の検討では、主定着部接着長 αD を無次元ひずみ超過領域 α_c を用いて $\alpha > \alpha_c$ と設定することにより、計算結果と同程度の耐荷性能を保証できることを実験的に明らかにしている。ここでは、 α_c を用いた AFRP シート曲げ補強 RC 梁の等せん断力区間におけるシートの必要接着長算定法について検討を行うこととする。

ここでは、図-11のような対称2点載荷を受ける単純支持 RC 梁を AFRP シートを用いて曲げ補強する場合を考える。まず、主曲げ補強領域として L_{yu} を求める。 L_{yu} は、断面分割法による計算降伏曲げモーメント M_y 、計算終局曲げモーメント M_u およびせん断スパン長 a を用いて、以下の式により得られる。すなわち、

$$L_{yu} = a (1 - M_y/M_u) \quad (2)$$

次に、主定着領域の接着長 L_a を、式 (1) により無次元ひずみ超過領域 α_c を求めて、以下のように算定する。

$$L_a > \alpha_c D \quad (3)$$

ただし、 α_c は無次元斜めひび割れ荷重 R_c が 1.0 以下の場合を対象とした推定値である。

以上より、等せん断力区間におけるシートの必要接着長 L_{req} は、式 (2), (3) を用いて、以下のように求められる。すなわち、

$$L_{req} > L_{yu} + L_a \quad (4)$$

ただし、

$$R_c \leq 1.0 \quad (5)$$

一方、断面剛性に段落し的な急変部がある場合には、その部分が弱点となって計算結果よりも耐力が低下する可能性がある。そのため、計算終局時のシート接着端部主鉄筋に生じる引張応力は降伏強度以下に抑制することが肝要である。このような条件を満たすためには、シートの必要接着長 L_{req} を、無補強断面の降伏曲げモーメント M_{yn} よりも大きな曲げモーメントが作用する領域 L' と同等以上に設定する必要がある。なお、 L' は以下のようにして求められる。すなわち、

$$L' = a (1 - M_{yn}/M_u) \quad (6)$$

以上のように、等せん断力区間におけるシートの必要接着長は、断面分割法による計算結果および式 (1) により得られる無次元ひずみ超過領域 α_c を用いて比較的簡易に求められることが明らかとなった。ただし、 α_c の算定式に関しては、未だ実験データが十分ではないことより、さらに種々の条件に対する実験結果を蓄積し、より信頼性の高いものにすることが必要である。

5. まとめ

本研究では、曲げ圧壊型の FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として、全面接着する場合と同程度の耐荷性能を保持するためのシートの必要接着長に関する検討を行うことを目的として、全面接着状態を基本にしてシートの接着長を変化させた静載荷実験を行った。検討は、全面接着の場合の実験結果を対象として、主鉄筋降伏領域を主曲げ補強領域、その支点側の領域を主定着領域と考え、主定着領域のシートひずみの挙動特性について行った。次に、その結果を基にして主定着部接着長を種々変化させた実験を実施し、シートの必要接着長の算定手法に関する検討を行った。本実験結果を整理すると、以下の通りである。

- 1) 主定着領域において実測ひずみが主鉄筋降伏先端部の計算ひずみよりも大きく示される実測ひずみ超過領域 ΔL_c を梁高 D で除した無次元実測ひずみ超過領域 α_c は、計算斜めひび割れ発生荷重 V_c の計算

終局曲げ耐力 P_{uc} に対する比 (無次元斜めひび割れ荷重) R_e と比較的高い相関関係にある。

- 2) 1) より, α_c の上限値を無次元ひずみ超過領域 α_c として, $R_e \leq 1.0$ の場合における α_c の算定式を提案することができた。
- 3) 主定着部接着長 αD において $\alpha < \alpha_c$ の場合には, シート接着端部のかぶりコンクリートが引き剥がれ計算終局曲げ耐力よりも小さな荷重で終局に至ること, $\alpha > \alpha_c$ の場合には全面接着時の計算結果と同程度の耐荷性能が保証できることを実験的に明らかにすることができた。
- 4) 従って, 主定着領域の必要接着長 L_a は, $L_a > \alpha_c D$ として評価可能である。
- 5) $R_e \leq 1.0$ の場合において, 等せん断力区間におけるシートの必要接着長 L_{req} は, L_{yu} を主曲げ補強領域とすれば, $L_{req} > L_{yu} + L_a$ として評価可能である。ただし, 計算終局時においてシート接着端部の主鉄筋が降伏しないように接着長を設定する必要がある。

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, 同大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室在学中の一瀬将吾君および鈴木健太郎君をはじめとする大学

院生に多大なる御支援を戴いた。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 一性能照査補強設計指針 (試案)一, コンクリート技術シリーズ 28, 1998.
- 2) 土木学会: コンクリート構造物の補強指針 (案), コンクリートライブラリー 95, 1999.
- 3) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000.
- 4) 土木学会: 性能照査システムにおけるコンクリート構造物の補強, コンクリート技術シリーズ 42, 2001.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683 / V-52, pp. 47-64, 2001.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 (平成 8 年制定) 設計編, 1996
- 7) Okamura, H., Higai, T.: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, *Proceedings of JSCE*, No. 300, pp. 131-141, 1980.

(2001 年 9 月 14 日受付)