

梁部材における FRP 面状補強材の界面接着・剥離メカニズムに関する研究

A Study on Bond and Debonding Mechanism of Bonded FRP Laminates in Beam Members

呉 智深*, 黒川 徹二**, 吉澤 弘之***, 平畑 裕嗣****

Zhishen Wu, Tetsuji Kurokawa, Hiroyuki Yoshizawa, Hiroshi Hirahata

*工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

**茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

***日鉄コンポジット株式会社 トウシート事業部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

****東洋紡績株式会社 機能材・メディカル事業本部 ザイロン事業部 (〒530-8230 大阪市北区堂島浜 2-2-8)

An experimental investigation and numerical analysis were conducted to identify bond, debonding and stress transfer of FRP plates and sheets bonded to concrete beams. First, the three kinds of failure modes i.e. FRP rupture, FRP debonding due to flexural cracks in the concrete, and peeling-off of FRP due to concrete shear cracks, were reproduced quantitatively by varying the reinforcement ratio of FRP. In order to investigate the stress transfer and bond behavior effected by different materials, the Carbon FRP(CFRP) plate, CFRP sheet and PBO sheet were adopted in the experiment. Based on the experimental results, the bond and debonding mechanism is discussed. In addition, the FEM analysis was carried out to investigate the effects on FRP stress distributions, interfacial stress transfer around the flexural crack and initial debonding behavior by the parameters such as Young's modulus, thickness and cut-off point of composite materials.

Key Words : CFRP sheet and plate, PBO sheet, stress transfer, debonding, Peeling-off of FRP, FRP rupture, FEM, strengthening, Concrete beams

1. はじめに

近年、構造物の維持管理費用が増大することに伴い、構造物の老朽化・劣化対策として補修・補強技術の高度化に関する開発が要求されているのが現状である。

数多くの補修・補強工法（コンクリートの増厚工法、外ケーブル工法、接着工法など）の中で、エポキシ樹脂系接着剤を用いて既存鉄筋コンクリート構造物の表面に鋼板、連続繊維板（以下、FRP 板）、連続繊維シート（以下、FRP シート）の貼り付けや巻き付けによる接着工法が有効かつ便利な補強工法として定着しつつある。

しかし、FRP のような面状補強材による接着補強工法の補強設計手法を確立するためには、本質的に検討すべき問題が数多く残されていると考えられる。その中で、もっとも基本的問題と思われる接着界面の接着特性および剥離特性が十分把握されたとは言えない状態である。また、接着界面の接着・剥離特性が構造物全体の破壊メカニズムに非常に複雑な影響を与えるので、その解明が期待されている。これに関して一つの知見として、面状補強材の界面剥離による付着特性を代表的な破壊形式と考え、その終局性能評価を含む新しい設計手法を構築することが必要であると指摘されている¹⁾。

これらの背景のもとに、本研究では FRP 面状補強材の材質と厚さ、接着幅などを因子とした実験かつ解析的研究を実施した。具体的には、高強度炭素繊維シート（以下、CFRP シート）、繊維体積含有率 60% の炭素繊維板（以下、CFRP 板）、および東洋紡績(株)が新規開発した PBO（ポリアラエーレンベンゾビスオキサゾール）繊維シート（以下、PBO シート）を用いて補強した無筋コンクリート曲げ供試体による静的載荷試験を実施し、曲げ供試体としての界面せん断応力伝達メカニズム、補強効果（剥離耐力、終局耐力）および破壊性状などに関して実験的検討を行った。また、接着界面のせん断応力伝達や剥離メカニズムの解明に関する有限要素解析を行い、初期剥離の性状に影響を及ぼす諸因子に関しての検討も行った。紙面の都合により、本論文では、梁部材における FRP とコンクリートの界面のせん断応力伝達性状、初期剥離の発生メカニズムを中心に論じることとする。

2. FRP 接着により補強された曲げ供試体の製作

2.1 供試体の寸法および形状

本研究では、FRP の接着性状や補強効果を確認するため、鉄筋の影響を受けない無筋コンクリート梁供試体(図

ー1) を用い、FRP の応力分布、初期ひび割れ発生荷重、FRP の初期剥離発生荷重、破壊荷重およびひび割れの発生・進展、ならびに剥離の発生・進展などの詳細な測定・観察を行った。今回、実験パラメータとしては FRP の種類、接着幅 B、FRP の補強量、FRP の厚さ t (積層数) を用いた。

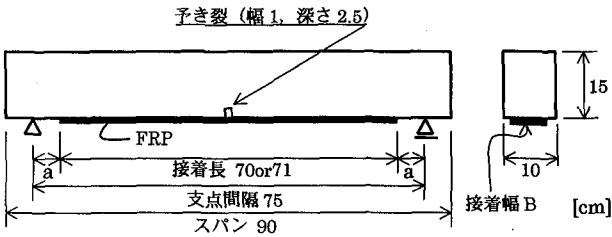


図-1 無筋コンクリート供試体の詳細

2.2 構成材料の特性

供試体の製作に使用したコンクリート、CFRP 板 (板厚 1mm)、CFRP シート (PAN 系高強度)、PBO シート (HM (高弾性) タイプ) の基本的な材料特性を表-1 に示す。PBO 繊維は有機繊維であるが、そのヤング率、引張強度は高強度炭素繊維と同等以上の特性を有し、繊維のせん断強度や耐衝撃特性等に非常に優れた繊維である²⁾。FRP シートと比較するために CFRP 板の設計厚さは、板厚に繊維体積含有率 (60%) を乗じたものを示した。従って、CFRP 板のヤング率、強度は樹脂を含まない 100%繊維としての値である。また、供試体の製作に使用したコンクリートの配合と各試験値の詳細について表-2 に示す。

表-1 材料特性

材料		特性	特性値
コンクリート		ヤング率	21.5 (GPa)
		圧縮強度	24.5 (MPa)
		ポアソン比	0.16
補強材 (FRP)	CFRP板 (板厚1mm)	設計厚さ	0.6 (mm)
		ヤング率	235.0 (GPa)
		引張強度	4.1 (GPa)
		ポアソン比	0.3
	CFRPシート (PAN系高強度)	設計厚さ	0.111 (mm)
		繊維目付	200 (g/m ²)
		ヤング率	230.0 (GPa)
		引張強度	4.1 (GPa)
		ポアソン比	0.3
	PBOシート (HMタイプ)	設計厚さ	0.128 (mm)
		繊維目付	200 (g/m ²)
		ヤング率	270.0 (GPa)
		引張強度	4.5 (GPa)
		ポアソン比	0.3

表-2 コンクリートの配合と各試験値

圧縮強度 (MPa)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
24.5	12	3.5	75	49	185	247	916	961

表-3 に試験を実施した供試体の一覧を示す。ここで表中にある分類記号の意味は、CP が CFRP 板 (板厚 1mm)、CS が CFRP シート、PS が PBO シート、最初の数字が積層数、最後の数字が接着幅を表している。また、表中における a とは支点と FRP 部材の接着端部との距離を示し、補強比とは、 A_{FRP}/A_c (A_{FRP} : FRP の断面積 A_c : コンクリートの断面積) を用いて算出した値である。

表-3 供試体一覧

分類記号	材質	厚さ (積層数)	接着幅 B (cm)	a (cm)	補強比 (%)
CP-1-5	CFRP板	1mm	5	2.5	0.2
CS-1-6.5	CFRPシート	1層	6.5	2	0.048
CS-1-8.5		1層	8.5	2	0.063
CS-1-10		1層	10	2.5	0.074
CS-2-10		2層	10	2.5	0.148
PS-1-6.5	PBOシート	1層	6.5	2	0.055
PS-1-8.5		1層	8.5	2	0.073
PS-1-10		1層	10	2.5	0.085
PS-2-5		2層	5	2	0.085
PS-2-10		2層	10	2.5	0.171
PS-4-5		4層	5	2.5	0.171

3. FRP 接着補強梁の曲げ載荷試験

3.1 曲げ載荷試験方法および測定項目

今回の曲げ載荷試験では、支点間隔 75cm の 3 点曲げとし、荷重制御で実施した (図-2)。荷重速度は 1kN/min とし、初期ひび割れが発生するまでは 1kN ごとに荷重を保持しながらひび割れの発生を観察した。ひび割れ発生後は 5kN ごとに荷重を保持し、ひび割れ観察を継続した。

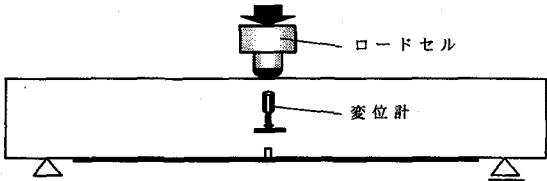


図-2 3点曲げ載荷試験方法

測定項目は、変位、側面のコンクリートひずみおよび FRP のひずみ分布、ひび割れ幅である。また、荷重特性値として初期ひび割れ発生荷重、初期剥離発生荷重、破壊荷重などを目視や計測で求めた。ひずみの測定には、コンクリート部で片側の側面に 8ヶ所、FRP 部では底面に 15ヶ所 (中央部と端部は界面せん断応力の伝達を調べるため、測定点間隔を狭くした) に貼り付けた検長

5mm のワイヤストレインゲージにより測定した。また、ひび割れ幅は、梁中央部での底面から 3.5cm の位置に検長 100mm のクリップゲージを配置して測定した。FRP 部材のひずみ測定位置を図-3 に示す。

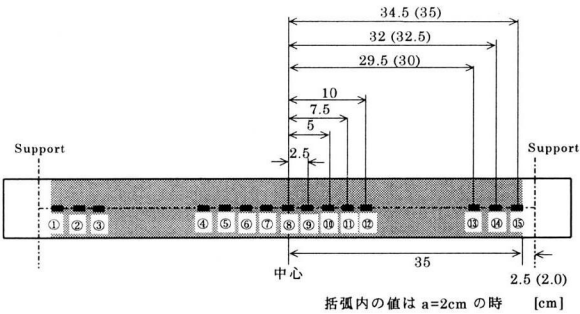


図-3 FRP 部材底面部のひずみ測定位置

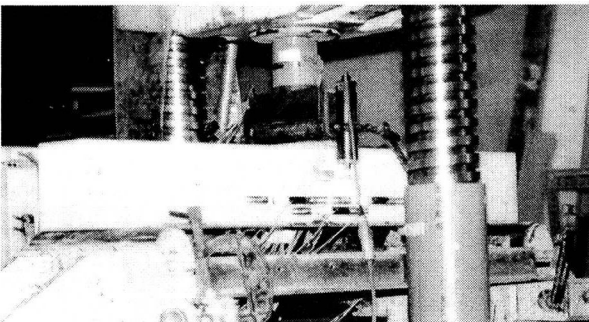


写真-1 試験状況

3.2 試験結果および考察

(1) 試験結果一覧および荷重－変位関係

今回の曲げ試験で得られた各供試体の初期ひび割れ発生荷重、初期剥離発生荷重、破壊荷重および供試体の最終破壊形式を表-4 にまとめる。

表-4 曲げ試験結果一覧

供試体名	初期ひび割れ荷重 (kN)	初期剥離発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	破壊形式
CP-1-5	9.3	19.0	28.3	B
CS-1-6.5	7.5	9.2	15.0	C
CS-1-8.5	6.0	11.2	22.9	C
CS-1-10	3.1	13.0	26.2	A
CS-2-10	5.0	18.0	33.9	B
PS-1-6.5	6.5	10.3	13.8	C
PS-1-8.5	4.5	11.8	25.1	A
PS-1-10	9.1	13.4	29.7	B
PS-2-5	8.0	14.0	21.7	A
PS-2-10	10.5	19.0	29.0	B
PS-4-5	7.0	21.0	32.0	B

A：曲げひび割れ端部とする FRP 界面剥離破壊
B：せん断ひび割れの端部とする FRP のピーリング破壊
C：FRP の破断破壊

また、各供試体の荷重－変位関係を図-4 (a) ～ (c)、

図-5、図-6、図-7 に示す。ここで、図-4 (a) はコンクリート曲げひび割れの端部を起点とした界面剥離破壊を起こした供試体について、図-4 (b) はコンクリートせん断ひび割れの端部を起点とし、FRP とコンクリートの界面にせん断ズレ作用と局所曲げ応力により、FRP ピーリング破壊を起こした供試体について、図-4 (c) は FRP 破断破壊を起こした供試体について、図-5 は補強量は同等であるが接着幅・積層数が異なる供試体について、図-6 は CFRP の補強量の変化によって破壊形式が異なった供試体について、図-7 は PBO シートと CFRP シートについて比較したグラフである。グラフ中にある凡例の順序は、上から補強比の大きい順に示している。なお、供試体 PS-2-5 については計測器の問題のため除外した。

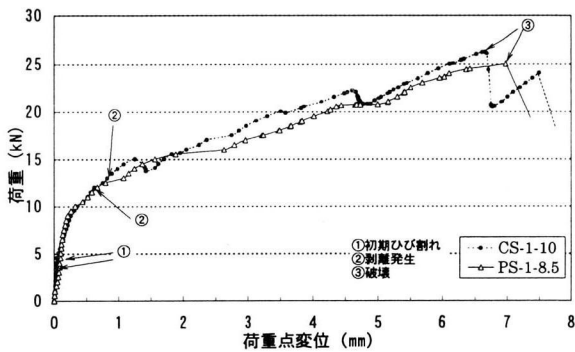


図-4 (a) 界面剥離破壊を起こした供試体

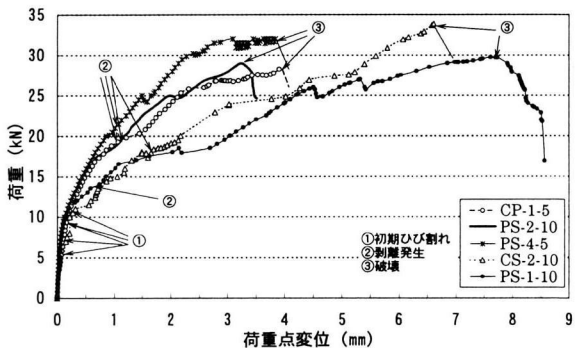


図-4 (b) ピーリング破壊を起こした供試体

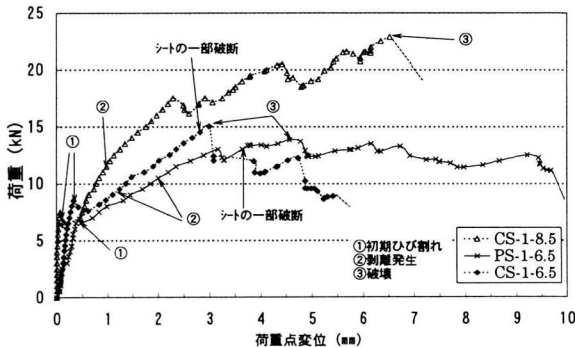


図-4 (c) 破断破壊を起こした供試体

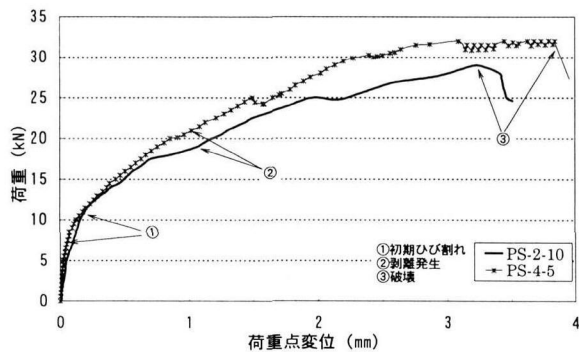


図-5 荷重-変位関係（シート厚さ、接着幅の比較）

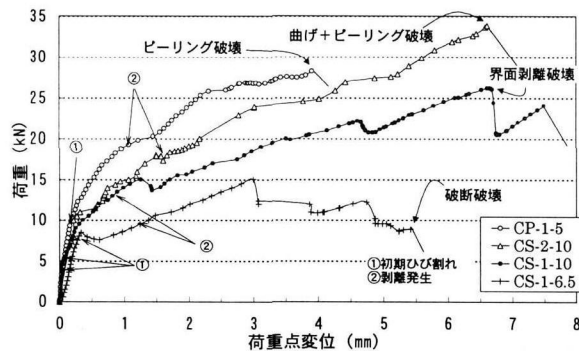


図-6 荷重-変位関係（破壊形式の変化）

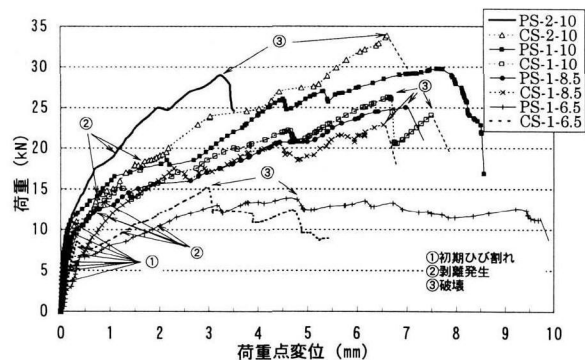


図-7 荷重-変位関係（PBO シートと CFRP シートの比較）

(2) ひび割れ・剥離・破壊状況

各供試体の最終破壊状況の写真を破壊形式ごとに分類して写真 2 (a) ～ (c) に示す。

供試体の初期ひび割れが発生した後、破壊に至るまでの経緯は以下に示す通りである。

初期ひび割れ荷重に達すると、曲げひび割れはいずれも予き裂部から発生し、荷重の増大に伴って梁の上縁に向かって進展していった。補強量が小さい供試体では、低荷重状態で上縁まで進展した。補強量の大きい供試体では、曲げひび割れの分布が多少分散する傾向が生じた。その後、荷重の増加につれて、曲げひび割れの成長後に載荷点に向かって斜め方向に発生・成長するせん断ひび割れを起点としてコンクリートと FRP の境界に剥離が発生した。最終的にはせん断ひび割れが卓越する供試体、

剥離が進展する供試体、剥離が進展しないうちに FRP の破断に至った供試体などの破壊形式が生じた。

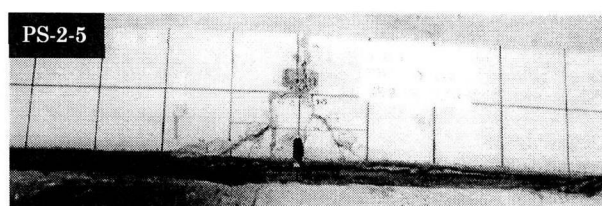
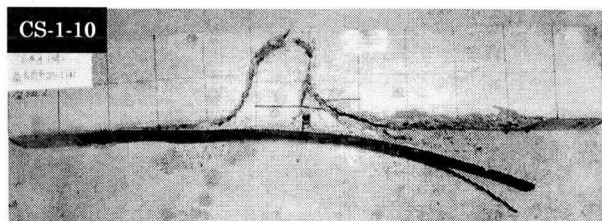


写真-2 (a) 界面剥離破壊を起こした供試体

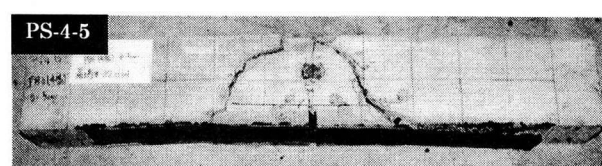
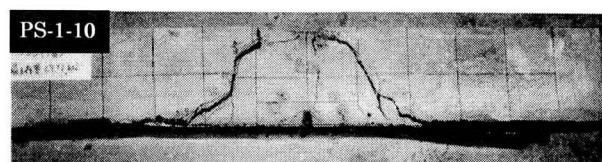
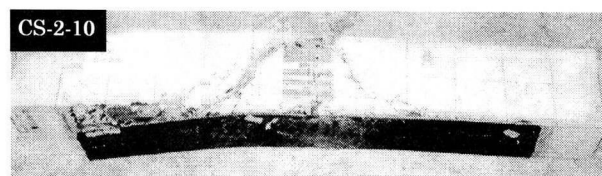
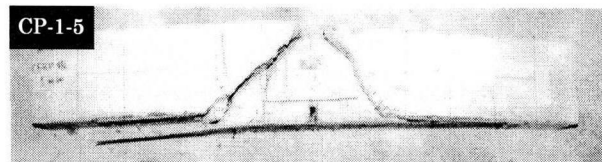


写真-2 (b) ピーリング破壊を起こした供試体

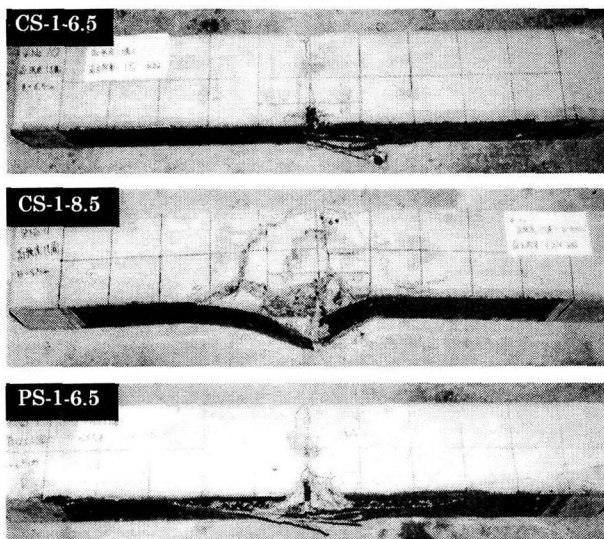


写真-2 (c) 破断破壊を起こした供試体

(3) 結果の考察

前項で示した結果などから明らかになった点について以下に述べる。

- ① 今回の実験においては、FRP の補強量の大小が初期剥離の発生および破壊形式の遷移に密接に関係していることが分かった。初期剥離に関しては、図-6 に示すように補強レベルが大きくなるに従い初期剥離の発生荷重が大きくなる傾向である。破壊形式に関しては、写真-2 に示すように、順々に FRP の破断破壊・曲げひび割れの端部を起点とする FRP 界面剥離破壊・せん断ひび割れに起因する FRP のピーリング破壊という 3 パターンの破壊形式が観察された。例えば、図-6 に示す供試体 CP-1-5, CS-1-10, CS-1-6.5 で比較すると、補強量が小さい (CS-1-6.5) と、写真-2 (c) のように曲げひび割れがそれほど進展・発生しないうちに FRP の破断強度に達し、破断し一気に破壊に至る。一方、補強量が大きければ (CP-1-5)、梁の曲げ耐力は増加するが、十分なせん断耐力を有していないため、写真-2 (b) のように曲げひび割れが梁上縁まで進展しないうちに、急激にせん断ひび割れが卓越してその端部からピーリング破壊を引き起こし、供試体自体のせん断耐力の限界に達してしまった。従って、図-4 (b) の供試体 CP-1-5, PS-4-5 に見られるように補強量が大きい供試体では、補強量が小さいものに比べて十分な靱性性状を発揮できないうちに脆性破壊が発生した。また、補強量が大きい程、変形能力が小さくなっていく傾向である。補強量が相対的に小さくなっている供試体 CS-2-10, PS-1-10 はピーリング破壊と判明したが、コンクリート曲げひび割れによる界面剥離破壊形式にも比較的に近いせん断破壊形式であった。また、補強量が中間レベル (CS-1-10) であると、写真-2 (a) のように予き裂部から発生した曲げひび割れが梁上縁まで十分進展し、その曲

げひび割れに向かって発生・進展した斜めひび割れを起点にしてコンクリートと FRP の界面に剥離が発生し、接着端部に向かって進展する。そして、残った接着面積 (斜めひび割れと FRP の交差位置から接着端部までの長さ) では荷重を支えきれなくなり剥離破壊に至る。

以上により、剥離破壊の発生は FRP 補強量に非常に敏感に影響されていることが言える。

今回の実験においては、破断破壊になるかあるいはピーリング破壊になるかの補強レベルの遷移領域は、補強比が 0.08% 以上 (ピーリング破壊) あるいは 0.06% 以下 (破断破壊) のあたりであると推測できた。すなわち、この中間が界面剥離破壊を起こす領域であると考えられる。もちろん、これらはコンクリートの強度、接着界面の接着状態にも関係していると思われる。

- ② 図-4 (a) に示す界面剥離を起こした供試体 CS-1-10 と PS-1-8.5 は、補強量がほぼ同様であるため、同様な変形特性や破壊性状になっている。従って、剛性がほぼ同様な PBO シートは CFRP シートに対して同様な補強効果を有していることが言える。ここで、剛性とは FRP の断面積にヤング率を乗じたものである。

- ③ FRP の材質が異なる供試体 CS-1-8.5 と PS-1-8.5 について比較する。両供試体の補強量の差はかなり小さいが、CFRP シートで補強した供試体 (CS-1-8.5) は破断破壊、一方、PBO シートで補強した供試体 (PS-1-8.5) は界面剥離破壊となった。これは、先の①に考察したようにシート補強量が破壊性状に敏感に影響を与えていることである。一方、破壊時の梁中央部におけるシートのひずみは、CFRP シートで補強した供試体 (CS-1-8.5) は約 10,000 μ , PBO シートで補強した供試体 (PS-1-8.5) は約 15,000 μ であった。よって、供試体 CS-1-8.5 は所定の引張強度に達しないうちに破断破壊したことになる。これは、コンクリートひび割れ端部の FRP 折り曲げにより、CFRP シートの引張強度が低減したと考えられる。この点では、PBO シートが曲げに強い素材であることが分かった。

- ④ 補強量が同等である供試体 PS-2-10 (2 層, 接着幅 10cm) と PS-4-5 (4 層, 接着幅 5cm) について剥離耐力に関して比較する。軸引張によるせん断供試体に関する剥離耐力算定理論式³⁾ は次のように示せる。

$$P_{max} = B\sqrt{2G_fEt} \quad (1)$$

ここで、 P_{max} は、剥離耐力であり、FRP シートの最大軸力でもある。B: FRP の接着幅, G_f : FRP とコンクリートの界面の破壊エネルギー (接着層に関係する), E: FRP のヤング率, t: FRP の厚さである。

式 (1) から理論上は接着面積の大きい PS-2-10 (2 層, 接着幅 10cm) の方が、剥離耐力が大きくなる。しかし、今回の曲げ試験の剥離発生荷重は、理論とは逆

でPS-4-5（4層，接着幅5cm）の方が大きくなった。

この理由として界面の破壊形式の違いによって破壊エネルギーが変化することによるものと考えられる。写真-3に示すようにPS-4-5（4層，接着幅5cm）の方がPS-2-10（2層，接着幅10cm）に比べて，剥離時にPBOシートとコンクリート界面でシート側にコンクリートが厚く付着した状態で剥離していることが分かる。すなわち，界面の破壊エネルギーが大きくなったと考えられ，このため剥離耐力が上昇しているのである。従って，通常理論上ではコンクリートの特性にしか依存しない G_f は，FRPの厚さによって変化する剥離界面の剥離状態と位置によって変化する場合もある。

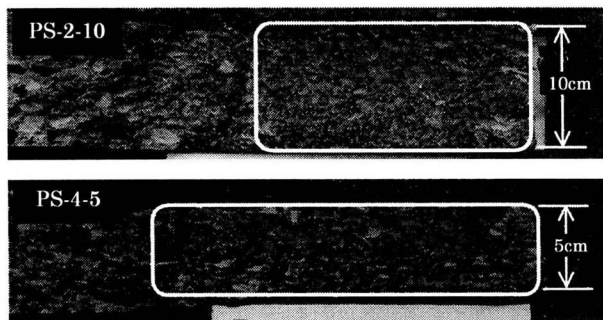


写真-3 接着層の破壊の比較

(3) FRP 底面の応力分布および付着性状

今回の曲げ試験により得られた各荷重段階における応力分布を図-8 (a) ~ (c) に示す。ここで，図-8 (a) は界面剥離を起こした供試体（CS-1-10，PS-1-8.5），図-8 (b) はピーリング破壊を起こした供試体（CP-1-5，PS-2-10，PS-4-5，CS-2-10，PS-1-10），図-8 (c) は破断破壊を起こした供試体（CS-1-8.5，PS-1-6.5，CS-1-6.5）である。グラフにおける太い実線は剥離が発生（初期剥離）したときの応力分布であり，太い波線（CS-1-6.5，PS-1-6.5）はFRPの一部破断が生じたときの応力分布である。

また，剥離発生時，FRP一部破断時，破壊時の梁下縁（FRP底面部）におけるひずみおよび応力の最大値を表-5に示す。

なお，供試体CS-1-8.5の梁中央におけるひずみの値は，測定問題の関係で信頼性がなかったので除外した。

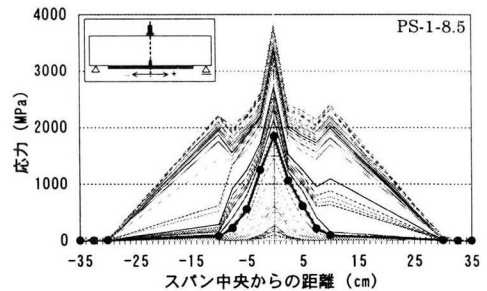
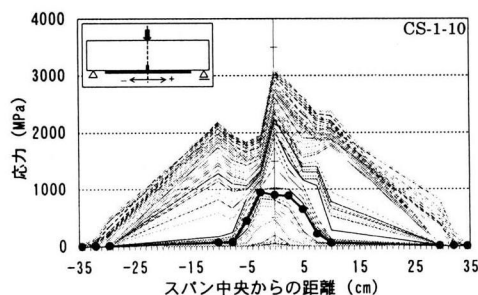


図-8 (a) 界面剥離破壊を起こした供試体の応力分布

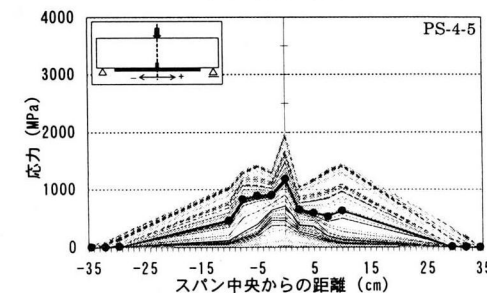
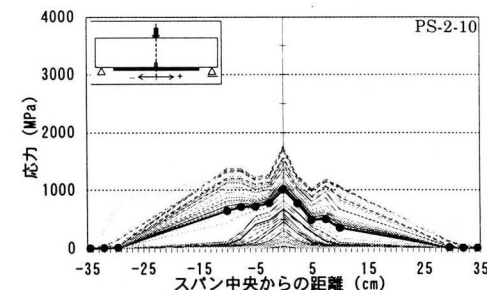
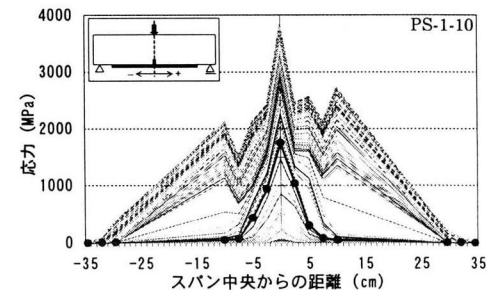
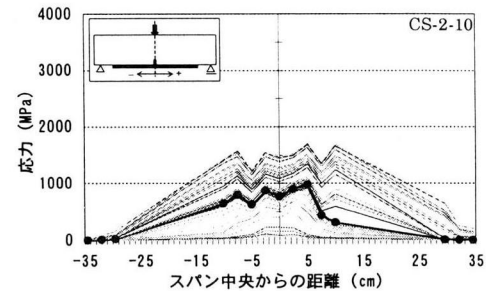
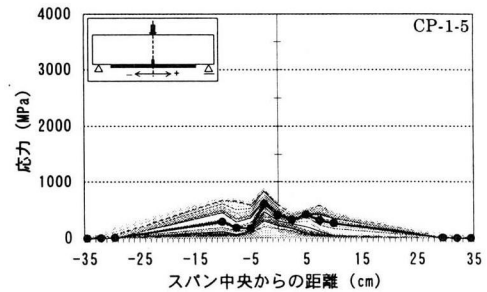


図-8 (b) ピーリング破壊を起こした供試体の応力分布

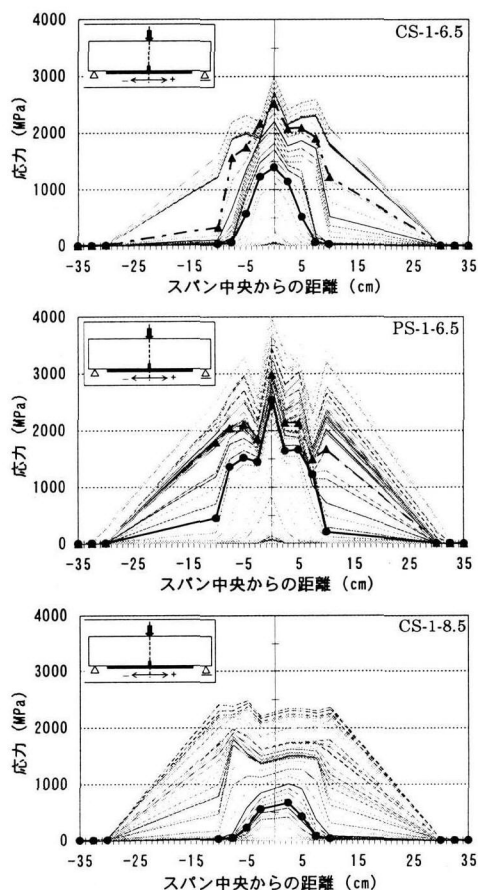


図-8 (c) 破断破壊を起こした供試体の応力分布

表-5 初期剥離, 破断時等の
FRP のひずみ(μ), 応力(MPa)

供試体名		初期剥離時	一部破断時	破断時
CP-1-5	ひずみ	2,591	—	3,786
	応力	609	—	889
CS-1-6.5	ひずみ	6,082	10,960	12,986
	応力	1,399	2,521	2,986
CS-1-8.5	ひずみ	2,912	—	10,754
	応力	669	—	2,473
CS-1-10	ひずみ	4,109	—	12,750
	応力	945	—	2,932
CS-2-10	ひずみ	4,238	—	7,458
	応力	975	—	1,721
PS-1-6.5	ひずみ	9,380	11,033	15,350
	応力	2,532	2,979	4,144
PS-1-8.5	ひずみ	6,842	—	14,919
	応力	1,847	—	4,028
PS-1-10	ひずみ	6,498	—	7,705
	応力	1,754	—	2,080
PS-2-10	ひずみ	3,716	—	5,892
	応力	1,003	—	1,590
PS-4-5	ひずみ	4,395	—	7,413
	応力	1,186	—	2,001

通常, FRP シートや板の剥離が生じるまで, 3 点曲げ試験による応力分布は梁中央部を頂点とする三角形分布になるが, 今回の試験では 4 点曲げ試験で見られるような台形分布を呈している応力分布も見られた. この原因としては, 卓越したせん断ひび割れの発生に伴ない, 載

荷点直下近傍にアーチ状にひび割れが形成され, そのせん断ズレ作用の影響で中央部のコンクリートが押し抜かれ, その部分の FRP のひずみが均等化したためであると考えられる. 特に, この傾向はせん断ひび割れに起因するピーリング破壊を起こした供試体 (CP-1-5, CS-2-10 など) に見られた. 但し, 界面剥離破壊が生じた供試体に関して, 中央付近のコンクリート曲げひび割れの端部から剥離の進展に伴ない, 剥離領域の FRP 部材の応力が徐々に均等になっている.

いずれの供試体の応力分布においても剥離が多少進展していく様子が伺えるが, 剥離破壊を起こした供試体 (CS-1-10, PS-1-8.5) においては, 初期剥離発生後, 剥離の進展に伴ない分布形状が平らになる傾向がある.

界面剥離破壊を起こした供試体 (CS-1-10, PS-1-8.5) と破断破壊を起こした供試体 (CS-1-8.5, PS-1-6.5) を比較すると, 界面剥離破壊と破断破壊の FRP 補強量の遷移は, CFRP シートで 0.063~0.074, PBO シートで 0.055~0.073 と非常に同様の傾向である. また, 補強量が同等である供試体 PS-2-10 と PS-4-5 の初期剥離時のひずみ・応力値を比較することにより, 接着強度に FRP の厚さが影響していることが明確である.

CFRP 板で補強した供試体 (CP-1-5) のピーリング破壊時の応力は, 889MPa と強度に比べると非常に小さいものであった. 従って, 補強量が多い CFRP 板の場合, 引張性能を十分に引き出す前に, 急激にせん断ひび割れが卓越し, 供試体自体のせん断耐力の限界に達し, 供試体自体の破壊に至ったということがよく分かる. このことから過大の補強量になっていることが言える.

供試体 CP-1-5, CS-2-10, PS-2-10, PS-4-5 のように比較的 FRP の厚さが多い (剛性が高い) ものほど, 初期剥離発生時の応力分布の傾き (図-8 中の太い実線を参照) が緩やかになり, その結果, 接着界面のせん断応力伝達領域が長くなる. そのため, 剥離に対して抵抗する接着領域が長くなるので, 剥離耐力が向上するということが明らかである. 従って, FRP の厚さは界面せん断応力の伝達性状および初期剥離の発生メカニズムを解明するための重要な要因となってくる.

そこで, これらの実験結果を踏まえて線形有限要素解析を用いて接着界面および FRP 部材の応力解析を行って, 曲げ部材における界面せん断応力伝達性状・初期剥離に影響を及ぼす諸因子の検討をすることにした.

4. 接着界面の剥離メカニズム

4.1 界面剥離とせん断応力の関係

図-9 に示すように界面剥離は, 曲げ部材にかかるモーメントの影響から FRP とコンクリートとの接着界面に沿ってせん断応力が生じると仮定できる⁴⁾. この界面に生じるせん断応力によって界面剥離が大きく進展して破壊に至る. 従って, 界面剥離の発生は界面せん断応力と密接な関係がある. そのため, 界面の接着および剥離

メカニズムを解明するためには、界面せん断応力伝達性状の把握が必要となってくる。そこで、界面せん断応力伝達性状に影響を及ぼす因子の検討を行うため有限要素解析を実施する。

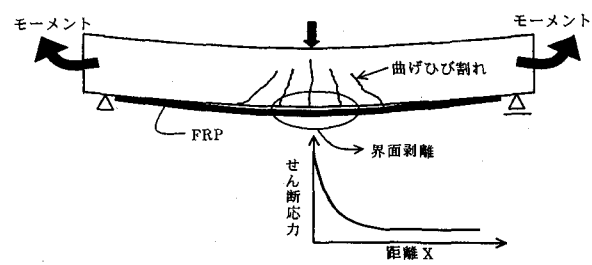


図-9 界面せん断応力

4.2 有限要素解析による接着界面の応力解析

(1) 解析モデルおよび諸条件

有限要素解析に用いた2次元モデルを図-10に示す。解析対象は、実験を実施した FRP で補強した無筋コンクリート供試体の左右対称の右半分であり、梁中央の曲げひび割れのみ考慮し、初期剥離発生直前までに着目して静的弾性解析を実施した。コンクリートと FRP の界面は完全接着として扱っている。解析に用いたコンクリート、FRP の材料特性は表-1 に示した値である。解析には汎用有限要素解析プログラムABAQUSを使用した。

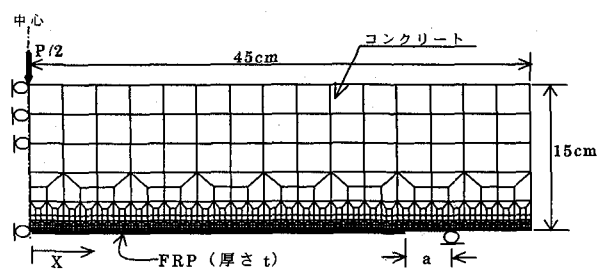


図-10 解析モデル

(2) モデルの適用性

初期剥離が発生する直前までのコンクリートの挙動は、一本の曲げひび割れを想定することにより理想化した。そのため、まず設定する曲げひび割れ長さの妥当性を検討する。図-11 (a), (b) には供試体 PS-1-10 に関して、初期剥離の発生直前における荷重レベル (P=8,9,10kN) での FRP 底面部の応力の実験値および曲げひび割れ高さ (hc) が異なる 6cm および 9cm の場合の解析値を示している。

これより、hc=6cm の場合、荷重が 8, 9kN の時は実験値と近似しているがそれ以上の荷重になると応力が増加なくなる。一方、hc=9cm の場合は、剥離発生直前 (P=10kN) での梁中央部における応力がほぼ同等であり、解析値は実験値の分布傾向を比較的良好に表している。従って、曲げひび割れ高さが 9cm であれば、初期剥離発生直前における傾向をとらえる解析モデルとして十分に

適用可能である。

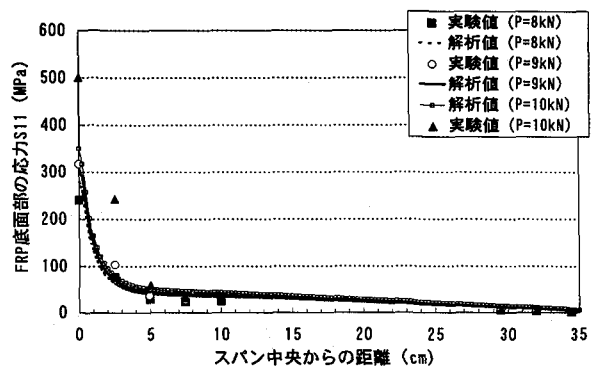


図-11 (a) 曲げひび割れ高さ 6cm の場合

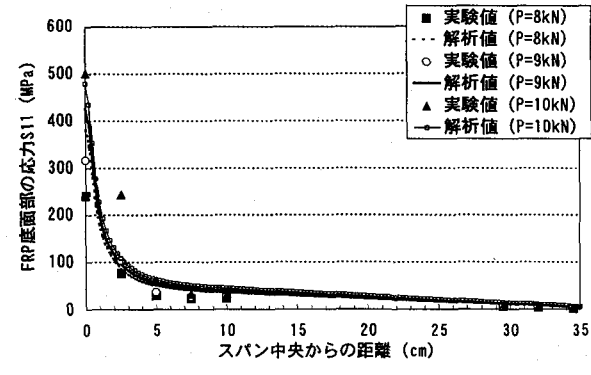


図-11 (b) 曲げひび割れ高さ 9cm の場合

(3) 界面せん断応力伝達性状

初期剥離の性状に影響を及ぼす諸因子の検討を行うためには、剥離と密接な関係にある界面せん断応力に着目する必要がある。そこで、前述した実験計画に考えられた実験パラメータを参考にして、FRP のヤング率、FRP の厚さ、FRP の剛性 (ヤング率×厚さ) 一定、支点から FRP 部材の接着端部までの距離などをパラメータとして解析を行い、界面せん断応力への影響を検討した。その結果を図-12～図-15に示す。いずれの結果も梁中央部における界面の最大せん断応力の値が 20MPa となったときのせん断応力分布である。また、実験から得られた初期剥離発生荷重を用いて解析した初期剥離時点における曲げひび割れ端部の FRP とコンクリート界面に生じる最大せん断応力の解析値を表-6に示す。

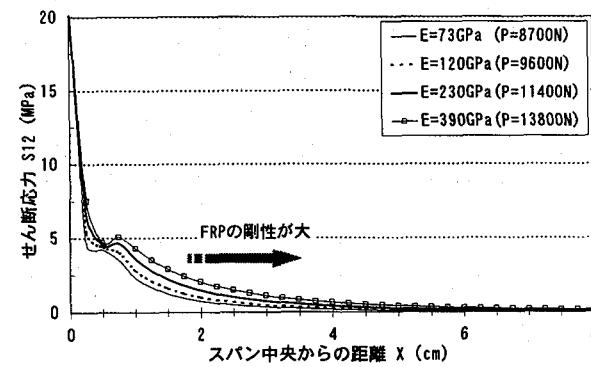


図-12 ヤング率による影響

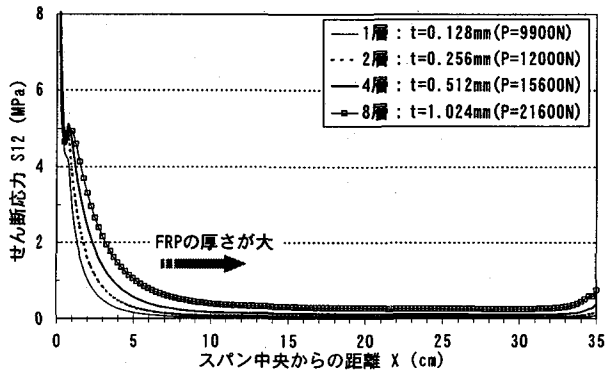


図-13 FRP の厚さによる影響

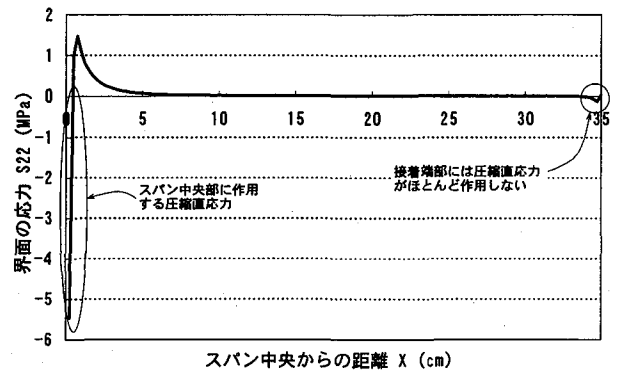


図-16 界面の直応力分布

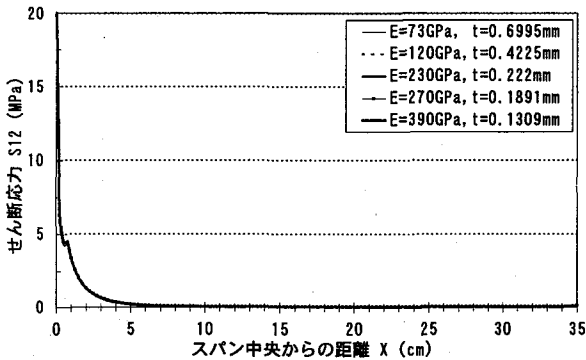


図-14 ヤング率×厚さ＝一定

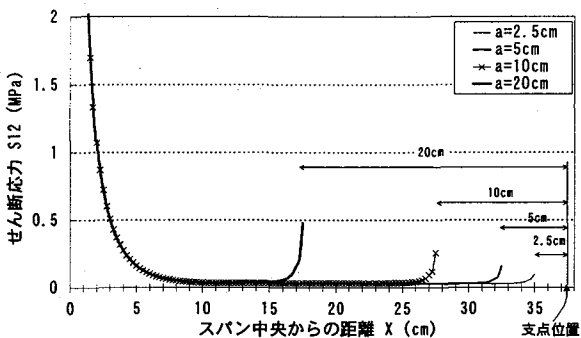


図-15 支点から接着端部までの距離の変化

表-6 初期剥離発生時点における
界面の最大せん断応力 (解析値)

供試体名	【実験値】 初期剥離発生荷重 (kN)	【解析値】 最大せん断応力 (MPa)
CP-1-5	19.0	33.36
CS-1-6.5	9.2	21.30
CS-1-8.5	11.2	24.67
CS-1-10	13.0	27.67
CS-2-10	18.0	32.09
PS-1-6.5	10.3	22.55
PS-1-8.5	11.8	24.35
PS-1-10	13.4	26.56
PS-2-5	14.0	27.97
PS-2-10	19.0	30.65
PS-4-5	21.0	34.55

これらの結果より明らかになった点について、以下に述べる。

- ①図-11 (a), (b) の実験および解析による結果からスパン中央の曲げひび割れの端部付近には、応力が集中している様子が分かる。このせん断応力の卓越が界面剥離を引き起こす要因となっている。
- ②図-12, 図-13 から FRP の剛性および FRP の厚さが界面のせん断応力伝達性状に大きな影響を及ぼすことが分かる。図に示すように FRP の剛性や FRP の厚さが大きくなることにより、界面のせん断応力伝達領域が長くなる。それにより、破壊に対して抵抗するエネルギーが大きくなる。すなわち、剥離耐力が向上するということと言える。また、表-6 の解析結果から分かるように初期剥離発生荷重時の界面最大せん断応力は 21.3~34.55 (MPa) と一定の規則性があると思われる。今後、界面の最大せん断応力度による初期剥離破壊基準が構築されていけると考えられる。
- ③図-14 に示すように FRP のヤング率×FRP の厚さを一定にしたときは、せん断応力分布に違いは全く見られない。従って、コンクリート界面のせん断応力分布および曲げ部材の初期剥離耐力は FRP の剛性という総合指標に依存することが分かる。
- ④FRP の接着端部におけるせん断応力集中には、FRP の厚さおよび支点と FRP 部材の接着端部までの距離が影響を及ぼすということが分かった。これは、図-13, 図-15 から FRP の厚さが増す、あるいは、支点と FRP 部材の接着端部の距離が増すことにより接着端部にせん断応力が集中する。これにより接着端部からの剥離を生じやすくなる。図-16 に示すように界面の圧縮直応力などの存在を有するスパン中央での剥離により、全く拘束を受けない接着端部の剥離が発生すると一気に破壊に至ることが考えられ、より脆性的な破壊になるということである。

従って、梁部材に接着補強を施す場合には FRP の厚さに留意し、接着端部のせん断応力集中度合いが十分小さくなる位置までの十分な定着長が必要である。

5. おわりに

本研究は、FRPにより補強した梁部材における補強効果や破壊性状、また、接着界面のせん断応力伝達メカニズムや剥離メカニズムの解明を目的として無筋コンクリート供試体による曲げ試験および有限要素解析を実施した。それにより、以下のような結論が得られた。

まず実験からは、

- ①FRP 補強量の変化により FRP の破断破壊、せん断ひび割れの端部を起点とする FRP のピーリング破壊、曲げひび割れ端部を起点とする FRP 界面剥離破壊という 3 つの破壊形式を再現でき、補強比が 0.08%以上でピーリング破壊、0.06%以下で FRP の破断破壊を引き起こすということが分かった。
- ②CFRP シートと PBO シートの比較により PBO シートも CFRP シートと同様な補強効果があるということが確認され、ピーリング応力に、より強い特性があるということが分かった。
- ③FRP とコンクリートの界面の破壊エネルギー G_f も接着剥離面の状態、接着層の厚みによって変化していることが分かった。

また、実験で計画されたパラメータに関する有限要素解析からは、

- ①曲げひび割れ端部におけるせん断応力の集中が界面剥離を引き起こす要因となっていることが分かった。

②FRP のヤング率、厚さが界面のせん断応力伝達性状に大きな影響を及ぼすということ、また、コンクリート界面のせん断応力分布および梁部材の初期剥離耐力は FRP の剛性に依存することが分かった。

今回は初期剥離の発生メカニズムを中心として述べたが、今後、剥離破壊メカニズムを解明するためには、剥離進展を考慮した解析を実施する必要があると考えられる。

【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，コンクリート技術シリーズ 28，pp.I-249-I-258，1998
- 2) 吉澤 弘之，呉 智深，他：連続繊維シート補強 RC 梁のひび割れ間隔に関する実験的検討，土木学会第 54 回年次学術講演会概要集，V352，pp.704-705，1999
- 3) BJÖRN TÄLJSTEN：Strengthening of concrete Prisms using the Plate-bonding technique，International Journal of Fracture，pp.253-266，1996
- 4) 松崎 智優：CFRP シート緊張接着による鉄筋コンクリート構造部材の補強工法の開発，茨城大学修士論文，1999

(1999 年 9 月 17 日受付)