

CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート 曲げ部材の補強効果に関する実験的研究

呉 智深¹・松崎智優²・福沢公夫³・神田 建⁴

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

²学生会員 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 日立市中成沢町 4-12-1)

³正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

⁴オリエンタル建設株式会社 技術開発部 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-1-1)

筆者らはコンクリート構造物の曲げ耐力の補強効果およびひび割れ抑制効果を向上させることを念頭に置き、連続繊維シートの緊張接着による補強工法を提唱している。本研究は既報の無筋コンクリート供試体への補強効果を踏まえて、CFRPシートの緊張によるRC曲げ部材への補強効果を検討することを目的として、一連の実験検討を実施した。その結果、CFRPシートの緊張によりRC供試体においても曲げ耐力の補強効果およびひび割れ抑制効果が十分あることが明らかになった。また、供試体の補強前のせん断強度によってCFRPシートの緊張接着による補強効果が大きく影響を受けることを実証した。さらに、通常のRC梁理論の適用性を検討し、破壊モードごとに補強梁の曲げ耐力の算定および実験値との比較を行った。

Key Words : carbon fiber sheets, bond, prestressing, shear, reinforcement effect, cracking, RC beams

1. はじめに

平成7年の阪神・淡路大震災の発生によりいままですら以上に鉄筋コンクリート構造物の耐震補強が重要な問題となった。このような現状の中、連続繊維シート状補強材を利用したコンクリート構造物の新しい補強工法が注目され始めてきた。とりわけ、連続繊維シート (FRPシート) によるコンクリート構造物の外面接着や巻き立て接着工法が使われるようになってきた。

しかし、現状においてFRPシートによるコンクリート構造物の補修・補強を行うとき、FRPシートの高い能力を十分に生かしていない場合がある。また鉄筋コンクリート構造物のひび割れ拘束能力の向上を図るのにより有効な方法が求められている。これらの問題を踏まえて、著者らはFRPシートの持つ能力を有効的に利用し、その適用範囲を広げるため、既存の緊張工法概念を発展させ、FRPシートに緊張応力を与え、コンクリート構造部材に接着する補強工法により、コンクリート部材の終局耐力・靱性およびひび割れ抑制効果を飛躍的に向上させる工法を提唱してきた¹⁾²⁾。様々な確認実験および数値解析

により無筋コンクリート梁への一定の曲げ耐力増加とひび割れ抑制効果が確認されている。これより先にTriantafillouら³⁾は厚さ1mm程度のFRPシートの緊張接着による鉄筋コンクリート梁の曲げ補強を行い、その有効性を示唆している。

しかし、鉄筋コンクリートの曲げ部材のFRPシートの緊張接着による補強効果やひび割れ抑制効果は、主筋やせん断補強筋の鉄筋比、FRPシートの補強量および緊張応力度などの因子によって大きく変化し、究明されていないところが多い。また耐力算定に関する既存鉄筋コンクリート方式の算定法の適用性がまだ検討されていない状態である。そこで、本研究において、鉄筋コンクリート梁部材への補強効果の確認 (終局耐力、靱性の確保、ひび割れ抑制効果) および破壊性状の把握、耐力算定手法の検討、接着端部の定着などの問題を取り上げ研究を行った。

2. CFRPシート緊張接着工法

(1) CFRPシート緊張接着

本研究では、炭素繊維やアラミド繊維等の新素材の中でも、特に強度や弾性係数が高い炭素繊維

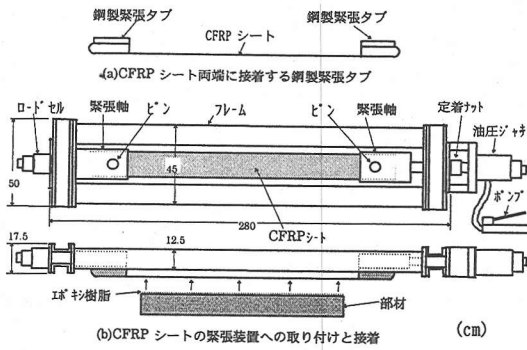


図-1 緊張装置の概要

(CFRP)シートを緊張し、エポキシ樹脂接着剤を用いてコンクリート部材に接着することにより、外側からのプレストレス導入を行い、コンクリート部材引張抵抗側に一定の圧縮応力を与えると同時に、圧縮抵抗側に一定の引張応力を与える。これにより、コンクリート部材のひび割れ抑制および耐力・靱性の向上が可能となる部材の補強を行う。

(2) 緊張装置

0.1~1.0mm程度の薄い面材であるCFRPシートを緊張させるために、従来のPC鋼線やFRPロッドの緊張装置とは違った装置の設計と開発が必要となった。そこで、実験室レベルでの使用に留まらず、実際の既設コンクリート構造物の平面部への補修・補強を念頭において装置の開発を行った²⁾。図-1に開発された緊張装置の概要を示す。

また、本装置のフレームには角型鋼管と鋼ブロック、緊張軸にはPC鋼棒を使用し、高強度かつ軽量の構造を実現した。

本装置を用いた施工プロセスの詳細については後に説明するが、基本的な手順としては、まずはじめに、あらかじめ所定の長さのCFRPシートの両端を、緊張力を保持するには十分な接着面積を有した鋼製緊張用タブ(鋼板2枚のサンドイッチタイプ)に、エポキシ樹脂で接着した状態で緊張装置の両端にピンを介してセットする。続いて、この状態のまま油圧ジャッキによって、CFRPシートに所定の緊張応力を加え、その後コンクリート部材に貼り付ける。これによって、コンクリート部材への外側からのプレストレス導入が可能となる。写真-1に本装置の様子を示す。

(3) CFRPシート接着端部の定着と補強

CFRPシートの緊張力をコンクリート部材へ導入する際には、CFRPシートの接着端部に大きなせん

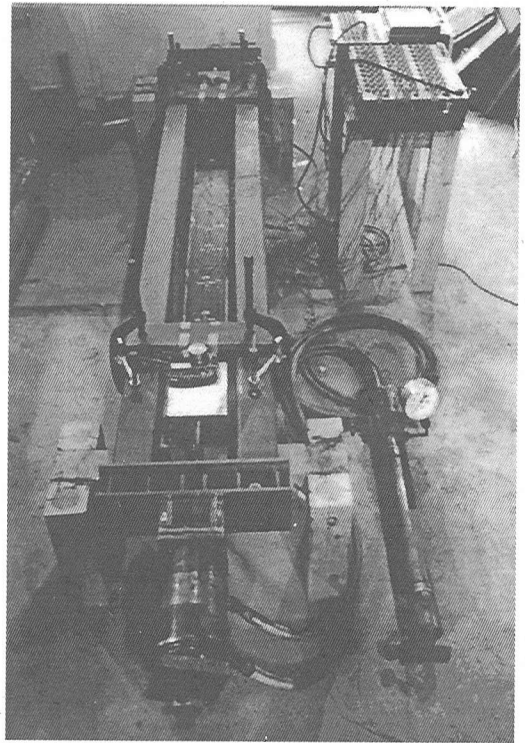


写真-1 緊張装置

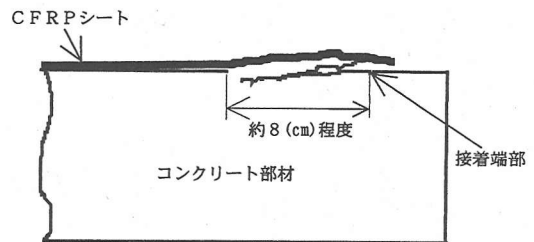


図-2 緊張力導入時の接着端部の剥離状況(概念図)

断応力が発生し、接着端部より剥離する可能性がある(図-2)。この現象は、図-3に示すようなFEMを用いた数値解析の結果から説明できる。緊張レベルの増加に伴い、FRP端部のせん断応力は接着強度を越えることによって剥離することとなる。

従って、CFRPシート緊張供試体の場合には、緊張力導入時において端部の応力集中を抑えるため、積極的に接着端部を何らかの方法で補強し、端部の定着を確保する必要がある。このように、CFRPシート補強コンクリート部材にとって、接着端部の応力低減や定着は重要な問題である。

そこで、本研究では前回の研究において有効であることが示された再接着法(図-4)によって、コンクリート部材の耐力・靱性の増加および接着端部の剥離防止を図る。

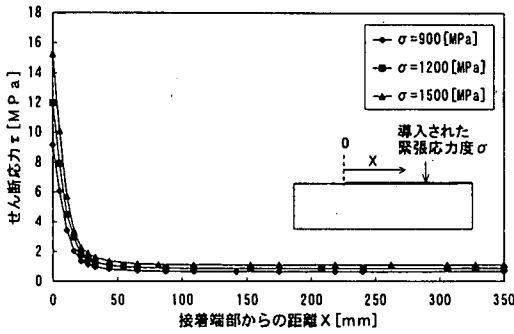


図-3 緊張解放時における接着界面のせん断応力分布

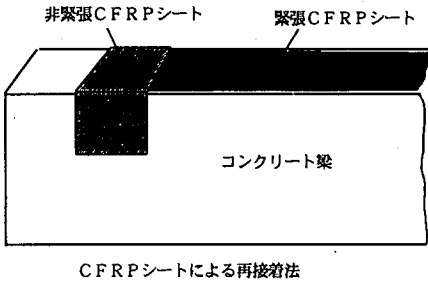


図-4 端部の補強方法

3. 部材のせん断耐力がCFRPシート緊張接着の補強効果に及ぼす影響

(1) CFRPシート緊張により補強された供試体の製作 (実験シリーズ1)

a) 供試体の寸法および形状

本研究では、本工法の有するコンクリート曲げ部材への高い補強効果を確認するため、鉄筋コンクリート梁部材 (図-5) を用いた。ここで供試体のせん断耐力がCFRPの緊張接着効果に及ぼす影響を検討するため供試体のせん断耐力を変化させ、せん断補強鉄筋の入った供試体とこのような供試体をさらにCFRPシートで側面せん断補強した供試体、そしてせん断補強鉄筋の無い供試体の3種類を採用した。また今回、実験パラメータとして緊張応力 σ_t (f_t はCFRPシートの引張強度)、CFRPシート枚数についても検討を行った。

なお、本工法の補強効果を検討するための比較として、無補強のRC供試体と無緊張のCFRPシートを接着して補強した供試体についても併せて実験を行った。

b) 材料特性

供試体の製作に使用したコンクリートと炭素繊維シート (PAN系高強度) およびエポキシ樹脂の基本的な材料特性を表-1に示す。また供試体製作に使

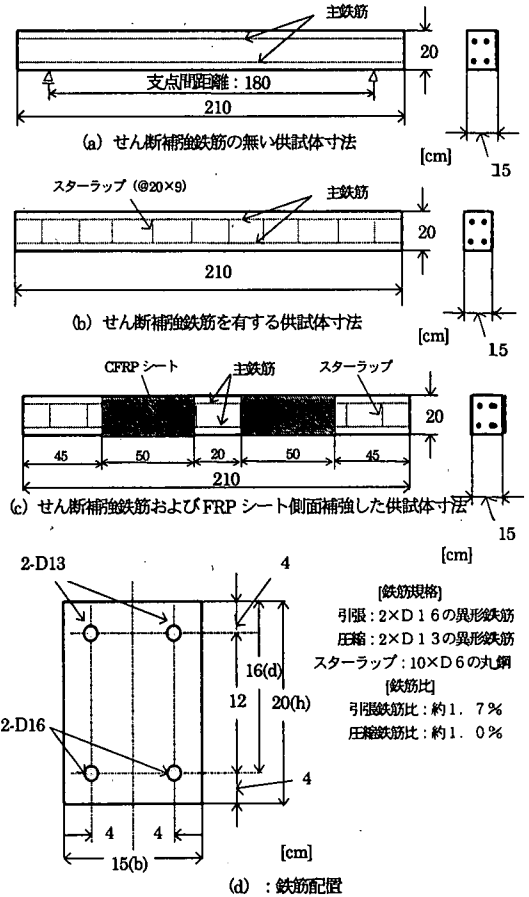


図-5 鉄筋コンクリート供試体の詳細

表-1 材料特性

材料	特性	特性値
コンクリート	ヤング係数 E_c [GPa]	25.4, 31.5
	圧縮強度 f_c [MPa]	30.2, 34.6
	スランブ [cm]	9.0, 10.5
鉄筋	ヤング係数 E_s [GPa]	210.0
	降伏強度 f_y [GPa]	0.36
	引張強度 f_t [GPa]	0.42
CFRPシート (PAN系高強度)	ヤング係数 E_t [GPa]	230.0
	引張強度 f_t [GPa]	3.2
	ポアソン比 ν_t	0.3
	繊維目付 [g/m ²]	200
エポキシ樹脂	設計厚さ t_f [mm]	0.111
	ヤング係数 E_e [GPa]	3.43
	ポアソン比 ν_e	0.35

用したコンクリート配合と、各試験値の詳細について表-2に示す。

表-3に供試体の詳細について示す。ここで表中にある分類記号の意味は、RCが鉄筋コンクリート

表-2 コンクリート配合と各試験値

圧縮強度	[MPa]	30.2	34.6
粗骨材寸法の最大寸法	[mm]	20	20
スランプ	[cm]	10	9
空気量	[%]	4	3
W/C	[%]	55	65
細骨材率	[%]	46	48
単位量 [kg/m ³]	水	165	165
	セメント	300	254
	細骨材	837	898
	粗骨材	986	984

表-3 供試体一覧

分類記号	圧縮強度 [MPa]	緊張応力	CFRPシート枚数	供試体種類
RC-0	30.2	0	0	図-5(a)
RC-1	30.2	0	1	図-5(a)
RC-2 (同 RC-1)	30.2	0	1	図-5(a)
RC-CP-1	30.2	$f_t/3$	1	図-5(a)
RC-CP-2	30.2	$f_t/4$	2	図-5(a)
RC-CP-3	30.2	$f_t/5$	2	図-5(a)
RCS-1	34.6	0	2	図-5(b)
RCS-CP-1	34.6	$f_t/4$	2	図-5(b)
RCS-S1	34.6	0	2	図-5(c)
RCS-CP-S1	34.6	$f_t/4$	2	図-5(c)
RCS-CP-S2 (同 RCS-CP-S1)	34.6	$f_t/4$	2	図-5(c)

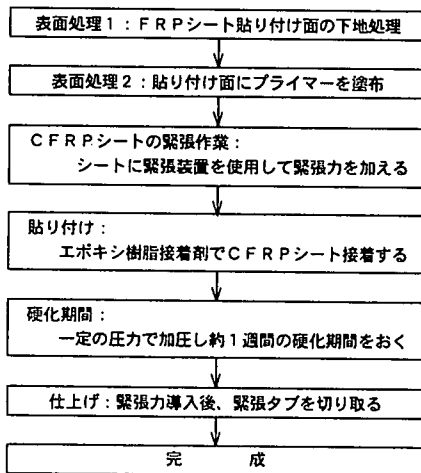


図-6 緊張供試体の製作手順

梁, RCS はスターラップが入った梁, CP は端部の補強方法 (図-4 の再接着法), S は側面補強, そして数字は供試体の番号を表している。

c) CFRP緊張による供試体への応力導入

CFRP 緊張によるコンクリート供試体への応力の導入過程は, 図-6 に示すように, まずはじめに炭

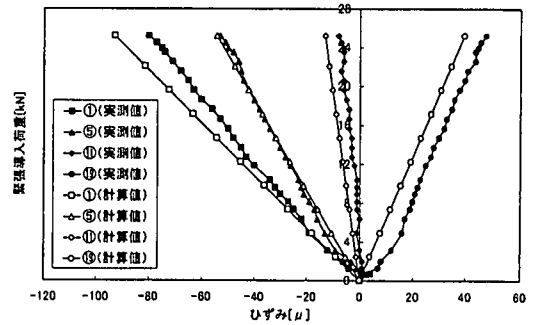


図-7 コンクリート内部のひずみ分布

素繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させたCFRPシートを用意する。次に, 緊張装置により緊張状態としたCFRPシートを, 下地処理を施したコンクリート供試体に接着する。この時注意するのは, 応力導入時に発生する接着端部の剥離を防ぐために, シートを接着すると同時に接着端部の補強も行わなければならないことである。その後, 接着剤が硬化したら, 緊張応力を徐々に解放し供試体に所定の応力を導入する。

また, この時のCFRP緊張応力は炭素繊維シートの引張強度とコンクリート引張強度から決定した。はりの圧縮線にひびわれが生じないように考慮すると同時にコンクリート引張強度 (3~4[MPa]) を考慮して最大緊張力の概算を行い, 炭素繊維シートの引張強度 f_t の1/5~1/3とした。ただし, FRPシートの端部定着に関して一定の補強を行うことを前提とするので, 最大緊張力の決定に, 過大な緊張力による接着端部の剥離問題を考慮しないことにした。

(2) 緊張力解放とコンクリート内部のひずみ・応力分布

緊張応力解放時のコンクリート供試体への緊張応力導入に伴う供試体のひずみ分布挙動を求めるため, 供試体中央部断面のひずみおよび応力の分布を測定した。その一例として以下に, 鉄筋コンクリート供試体の測定結果と有限要素法 (以下, FEM) を用いた計算結果の比較を示す。

a) コンクリート内部のひずみ分布

図-7 は, CFRPシート2枚を緊張応力 $f_t/4$ で補強した供試体 (RC-CP-2) の初期緊張応力解放時の測定ひずみ分布と有限要素法によって計算した計算値との比較を示している。なお, 図中のひずみの符号は, +が引張ひずみ, -が圧縮ひずみを表し, ひずみの測定位置は, 供試体底面からの距離を1, 3, 5, 9, 11, 17, 19cmと, 測定位置を示す番号と一致している。

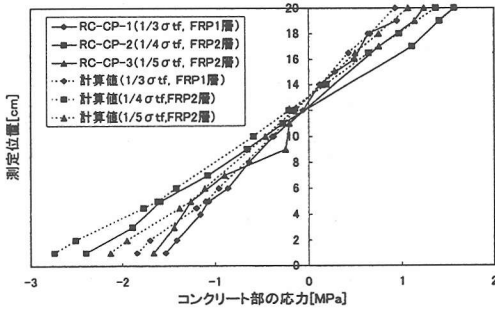


図-8 コンクリート内部の応力分布

図-7では、緊張荷重の増加に伴って、各測定点のひずみは直線的に増加しており、緊張導入直後のCFRPシート接着面の付近のひずみ(測定位置1cm)は、 $-80[\mu]$ の圧縮ひずみが生じていることがわかる。これを応力に換算すると $-2.03[\text{MPa}]$ となり、これによりひび割れ発生荷重と曲げ耐力増加などの補強効果が予想される。

また、計算値との比較では、引張側では若干計算値が小さく、反対に圧縮側では若干大きな値を示している。

b) コンクリートの応力分布

図-8に示すコンクリート内部の応力分布については、実測値と計算値とがほとんど一致している。しかし、全体的に供試体の上縁部では実測値より計算値のほうが若干高く、下縁部では計算値より実測値のほうが高い値を示している。また、供試体中の中立軸については、実測値、計算値ともによく一致している。

(3) 曲げ載荷試験

a) 曲げ試験方法及び各試験値

曲げ載荷試験は、支点間隔が180[cm]の3点曲げ載荷試験で行った(図-9)。実験の手順としては、まず載荷開始から10kNまでは1kN/min、10kNからは初期ひび割れが発生するまで1kNごとに荷重を保持しながらひび割れの発生を観察する。ひび割れ発生後は、再び1kN/minの速度で10kNごとに荷重を保持し、ひび割れの観察をしていく。次に鉄筋が降伏した直前・直後には、荷重を保持し、最大ひび割れ幅・平均ひび割れ間隔・最大ひび割れ間隔を測定し、ひび割れの様子をスケッチする。その後、CFRPシートの剥離発生を測定するため、載荷速度はやや遅めにして観察する。剥離発生を確認した後は10~20kN/minの速度で供試体が破壊するまで載荷を続ける。

曲げ試験により、①初期ひび割れ発生荷重、②剥

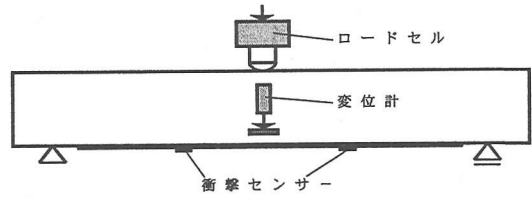


図-9 3点曲げ載荷試験方法

離発生荷重、③破壊荷重、④荷重作用点の変位、⑤コンクリート・CFRPシート・主鉄筋の各点のひずみ、⑥最大ひび割れ幅、⑦平均ひび割れ間隔、⑧最大ひび割れ間隔の8項目を測定した。ここで、CFRPシートの剥離発生荷重の測定は、CFRPシート表面に接着した圧電セラミックス衝撃センサーを用いて、剥離発生時のパルス電圧をシンクロスコープで捕らえて荷重を読みとる方法によった。

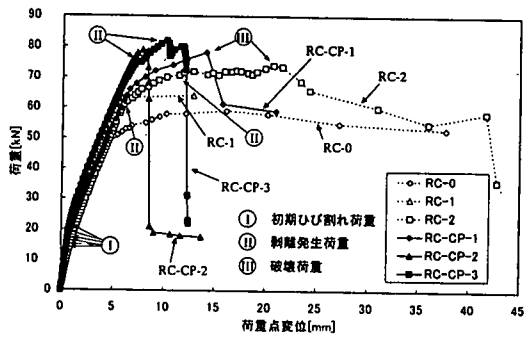
b) 実験結果および荷重-変位曲線

各供試体の曲げ載荷試験から得られた荷重-変位曲線を図-10(a)~(c)に示す。ここで、図-10(a)はせん断補強鉄筋の無い供試体について、図-10(b)はせん断補強鉄筋の入った供試体について、図-10(c)はせん断補強鉄筋および側面補強を施した供試体についてのもので、それぞれ無緊張供試体と緊張供試体との比較がされている。

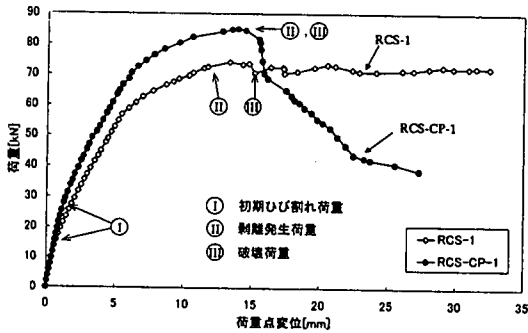
なお、図-10(a)中のRC-1の変位測定は、変位計固定の問題で試験途中で停止した。

また、初期ひび割れ発生荷重、剥離発生荷重、破壊荷重および供試体の破壊形式を表-4に示す。これらの結果より明らかになった点を以下に述べる。

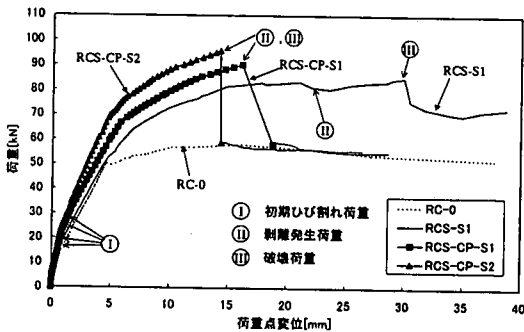
- ① せん断補強鉄筋の無い供試体においては、無補強梁(RC-0)と無緊張梁(RC-1, RC-2)の初期ひび割れ発生荷重にはほとんど変化はなかったが、緊張梁(RC-CP-1~RC-CP-3)の初期ひび割れ発生荷重においては、15~30%の増加がみられた。
- ② せん断補強鉄筋の入った供試体においては、緊張応力導入による補強効果で、無緊張梁(RCS-1)に比べ緊張梁(RCS-CP-1)は、初期ひび割れ発生荷重が80%、剥離発生荷重が18%、破壊荷重が15%増加した。ただし、供試体破壊時のシート破断ひずみは12,500 μ であり、コンクリートひび割れ箇所での折り曲げ作用により、シートは材料単体の強度より低い段階で破断している。
- ③ 無緊張梁に比べ緊張梁は剥離発生荷重および破壊荷重が10~20%増加した傾向が見られた。
- ④ 無補強梁、無緊張梁に比べ、緊張梁は曲げ耐力が増加した反面、靱性は低下している。これは、



(a)せん断補強筋の無い供試体



(b)せん断補強筋を有する供試体



(c)FRP シートによるせん断補強 (側面貼り付け)を行った供試体

図-10 荷重-変位曲線

緊張接着による曲げ補強能力の向上に伴い、CFRP シートの破断 (RC-CP-1) や、コンクリートのせん断ひび割れの進展による CFRP シートピーリング破断 (RC-CP-2, RC-CP-3) が発生するためである。その原因としては、まず CFRP シートの破断による靱性の低下に関して、過小な CFRP 補強量によるものと思われる。従って CFRP 緊張による構造物設計を行う際、一定の靱性を満足するための CFRP 補強量、緊張応力のレベルを適切に考慮する必要がある。また、供試体自体のせん断耐力の限界のため、せん断ひび割れが大きく進展し、CFRP シート

表-4 曲げ試験結果 (鉄筋コンクリート供試体)

供試体	初期ひび割れ荷重 [kN]	剥離発生荷重 [kN]	破壊荷重 [kN]	破壊形式
RC-0	14.7		57.8	B
RC-1	15	65	63.7	A
RC-2	14.7	68.9	67.5	A
RC-CP-1	18.6	74.5	77.5	C
RC-CP-2	16.7	74	77.6	D
RC-CP-3	20.6	78.4	80.9	D
RCS-1	13.7	72.2	73.5	A/E
RCS-CP-1	24.5	85	85	D
RCS-S1	14.7	82.1	85	A
RCS-CP-S1	22.5	90.2	90.2	C
RCS-CP-S2	22	95.8	95.8	C

A: CFRP シート界面剥離破壊

B: 曲げ+せん断破壊

C: CFRP シート破断破壊

D: せん断破壊+CFRP シートピーリング破壊

E: コンクリート圧壊

緊張により大きく上昇された供試体の曲げ補強能力が十分に発揮できないうちに、せん断破壊が発生してしまった。このことから、当然ながら曲げ補強の効果を期待するため構造体には十分なせん断補強を有する必要がある。

- ⑤ せん断補強鉄筋に加え、さらに側面を CFRP シートで補強した供試体においては、無緊張梁 (RCS-S1) に比べ緊張梁 (RCS-CP-S1, RCS-CP-S2) は、初期ひび割れ発生荷重が 80%、剥離発生荷重および破壊荷重が 10~15% 増加した。また、側面を補強したことにより、いままでの供試体に比べ、せん断耐力が大きく向上した。このため緊張梁の破壊直前では、梁中央部の CFRP シートのひずみが 15,000 μ に達し、応力は CFRP シートの引張強度に達し破断した。また、せん断破壊した供試体 (RC-CP-2, RC-CP-3, RCS-CP-1) と違って、CFRP 破断後、供試体の耐力は無補強の RC-0 供試体のレベルに維持できた。このことから CFRP の緊張の導入により上昇された供試体の曲げ耐力の限界に達し、曲げ破壊が発生したので、CFRP シートの能力を十分に発揮できたと言える。

c) 供試体のひび割れおよび破壊性状の観察

1) ひび割れ性状

表-5 に鉄筋降伏直前にある荷重レベルで測定した最大ひび割れ幅、平均ひび割れ間隔および最大ひび割れ間隔の測定値を示す。表-5 より、緊張され

表-5 ひび割れ幅・ひび割れ間隔

供試体	測定荷重 [kN]	最大ひび割れ幅 [mm]	平均ひび割れ間隔 [mm]	最大ひび割れ間隔 [mm]
RC-0	49	1.9	70	100
RC-1	49	0.4	57	100
RC-2	68.6	0.3	46	85
RC-CP-2	73.5	約 0.07	60	105
RC-CP-3	73.5	約 0.07	67	132
RCS-1	68.6	0.4	57	115
RCS-CP-1	68.6	約 0.07	58	100

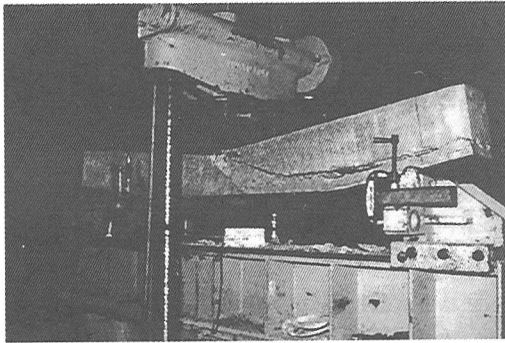


写真-2 曲げ・せん断破壊 (RC-0)

た供試体の鉄筋降伏前の最大ひび割れ幅はかなり微小であり、これにより緊張された供試体のひび割れ抑制効果について無緊張 CFRP シート補強の場合よりも大きく向上することを確認した。

2) 供試体の破壊状況

<せん断補強鉄筋のない供試体>

- ① 無補強 RC 梁 (RC-0) については、鉄筋の降伏および圧縮領域のコンクリートの圧壊に伴い曲げ破壊が先行し大きく変形した。最終的には梁端部から成長したせん断ひび割れによるせん断破壊で崩壊した (写真-2)。
- ② 無緊張の CFRP シートで補強した梁 (RC-1, RC-2) では、シートによる補強で曲げ耐力が増加したが、曲げ耐力に対するせん断耐力が相対的に低下することになる。そして、せん断ひび割れが大きく進展し、それを起点とした CFRP シート界面剥離が進展し、コンクリートのせん断ひび割れ部と CFRP シート間のピーリング破壊となった (写真-3)。
- ③ 緊張梁 (RC-CP-1) については、曲げに伴う応力が CFRP シートに与えられた初期応力に付加されることにより、CFRP シートの破断とともに破壊に至った (写真-4)。破断後の供試体は無補強梁と同程度の耐力を有し、同様の破壊挙動を示した。

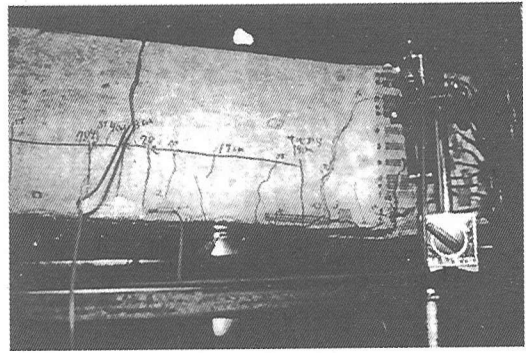


写真-3 CFRP シートとコンクリート間の界面剥離破壊 (RC-1)

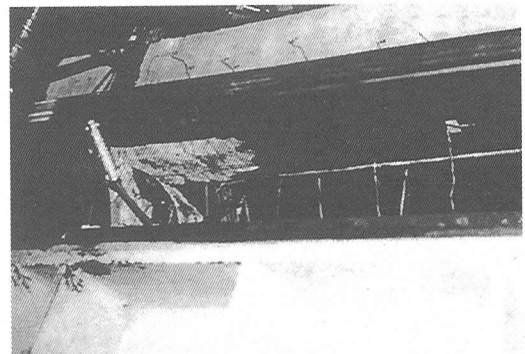


写真-4 CFRP シート破断破壊 (RC-CP-1)

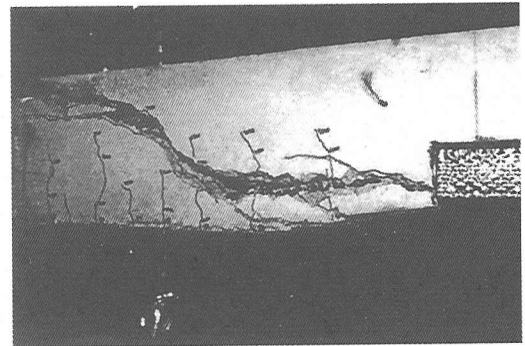


写真-5 せん断破壊+CFRP シートピーリング破壊 (RC-CP-2)

また、そのほかの緊張梁 (RC-CP-2, RC-CP-3) では、CFRP シートの枚数を増加したため、前述の RC-CP-1 でみられたような CFRP シートの破断は無くなり、梁の曲げ耐力が増加した。しかし、曲げ耐力の増加に見合う十分なせん断耐力を持っていないため、せん断ひび割れに起因する CFRP シートの剥離とコンクリートのせん断破壊とが同時に起こった (写真-5)。

＜せん断補強筋を有する供試体＞

- ① 無緊張梁 (RCS-1) では、せん断補強鉄筋のない供試体で多くみられたせん断ひび割れによるものではなく、成長した曲げひび割れの根本を起点として CFRP シートの界面剥離が進み、最終的にはコンクリート圧壊の発生に伴う CFRP シートの曲げ破壊となった。供試体の剥離破壊直前まで安定とした界面剥離が進んだため、かなりの靱性が見られた。
- ② 緊張梁 (RCS-CP-1) では、CFRP シートの緊張の曲げ補強効果により供試体の曲げ耐力が向上したが、十分なせん断耐力を有していないため、せん断ひび割れの卓越により、写真-3 と同じようなコンクリート部のせん断ひび割れと CFRP シート間のピーリング破壊へと移行した。

＜CFRP シート側面接着補強された供試体＞

- ① 無緊張梁 (RCS-S1) については、側面を CFRP シートで補強し、十分なせん断耐力を有しているため、梁中央部の曲げひび割れの卓越により、これを起点とした CFRP シートの剥離が発生し梁端部に向かって進展する。最終的には、端部を補強していたシートが剥離して破壊に至った。側面の CFRP シートによるせん断補強供試体 (RCS-1) と比べて剥離発生がかなり遅れており、荷重の上昇が見られた。
- ② 緊張梁 (RCS-CP-S1, RCS-CP-S2) では、前述したように供試体のせん断耐力が高いことに加え、CFRP シートの緊張による補強効果も相まって、ひび割れの進展および剥離の発生が抑制された。これにより梁中央部の CFRP シートに応力が集中し、写真-4 のようにシートが破断した。その後の耐力および破壊挙動は RC-CP-1 の場合と同様に、無補強梁と同じ挙動を示した。また最終的な破壊状況においては、側面の CFRP シートの破断や剥離などはみられなかった。

4. 十分なせん断耐力と端部定着を有する CFRP シート緊張梁供試体 (実験シリーズ 2)

本研究では、ここまでせん断耐力の異なる供試体を用いた実験検討を行い、本工法の補強効果を検証するとともに、CFRP シートの緊張による構造物の補強に当たった注意事項を提示した。ここでは十分なせん断耐力を有する鉄筋コンクリート供試体に対して、端部定着の剥離破壊を防ぐと同時に、一定の靱性能力を確保するための CFRP シートの補強量

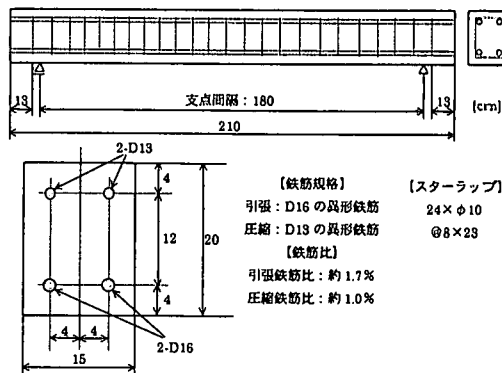


図-1-1 供試体の詳細

表-6 コンクリート配合と各試験値

粗骨材寸法の最大寸法 [mm]	20	
スランブ [cm]	6	
空気量 [%]	2	
W/C [%]	60.0	
細骨材率 [%]	47.0	
単位量 [kg/m ³]	水	165
	セメント	275
	細骨材	871
	粗骨材	993
	混和剤	5.5
圧縮強度 [MPa]	43.5	
ヤング率 [GPa]	30.2	

表-7 供試体一覧

供試体名	圧縮強度 [MPa]	緊張応力	CFRP シート枚数	端部補強法
無補強梁	43.5	0	0	無
無緊張梁	43.5	0	2	再接着法
緊張梁	43.5	f _t	2	再接着法

および緊張レベルに関する実験を行い、その補強効果に関する検討を試みる。

(1) 供試体の設計と製作

図-1-1 に示すように、密なスターラップ配置によって十分なせん断耐力を有する鉄筋コンクリート供試体を製作した。せん断補強筋の補強量やコンクリートの強度以外は前述の供試体シリーズ 1 と同様である。コンクリートの配合および各試験値を表-6 に示す。また、表-7 に供試体一覧を示す。なお、本シリーズの場合、CFRP シートの端部定着剥離を防ぐため十分な定着補強を行っている。

(2) 静的載荷試験および実験結果

曲げ試験の方法、手順および各測定項目はすべて

表-8 実験結果

供試体	初期ひび割れ荷重 [kN]	剥離発生荷重 [kN]	破壊荷重 [kN]	破壊形式
無補強梁	11.8	—	57.4	曲げ破壊
無緊張梁	13.7	65.7	82.3	CFRP剥離破壊
緊張梁	30	86.2	97.3	CFRP破断

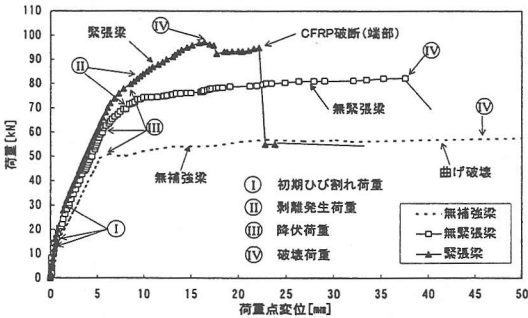


図-12 荷重-変位曲線

前述の実験シリーズ1と同一の条件で行うので、ここでの説明は省略する。なお、本実験シリーズでは、CFRP 緊張によるひび割れ抑制効果について十分な検討を行うため、各荷重ごとにひび割れの本数、最大幅、ひび割れ間隔などについて詳細な観察を行うこととした。

実験より得られた測定結果を表-8に、荷重-変位曲線を図-12に示す。

a) 各特徴荷重値および剛性の比較

これらの結果から無緊張梁と緊張梁との各荷重値を比較すると、まず初期ひび割れ発生荷重がおよそ2.2倍、鉄筋降伏荷重が1.17倍、剥離発生荷重が1.31倍、そして破壊荷重においては1.18倍となった。また、供試体の剛性を表す傾きについては、図-12からわかるように緊張梁の剛性は無補強・無緊張梁のものとは大きく、初期ひび割れ発生後もほとんど低下せずに鉄筋が降伏するまで傾きを保っていた。鉄筋降伏後は、無補強・無緊張梁とも、変形のみ増加するのに対し、緊張梁は最大荷重まである程度の勾配を保ち続けた。

b) ひび割れ本数・最大ひび割れ幅の比較

無緊張のCFRPを接着した場合、無補強梁に比べ初期ひび割れ発生荷重は1.16倍と、ほとんど増加していなかったのに対し、緊張梁は無補強梁の2.54倍と大きく増加している。また、各荷重ごとのひび割

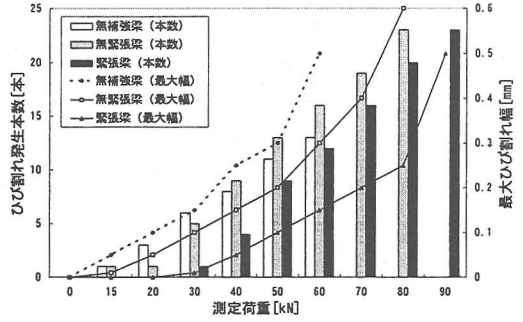


図-13 ひび割れ本数およびひび割れ幅の比較

表-9 鉄筋降伏直後のひび割れ幅・ひび割れ間隔の比較

供試体	測定荷重 [kN]	最大ひび割れ幅 [mm]	最大ひび割れ間隔 [mm]	平均ひび割れ間隔 [mm]
無補強梁	49	0.3	150	102
無緊張梁	80	0.5	120	58
緊張梁	82	0.25	110	63

れ本数、最大ひび割れ幅を図-13に、鉄筋降伏直後の最大ひび割れ幅、最大ひび割れ間隔、平均ひび割れ間隔を表-9に示す。

図-13では、同じ荷重レベルにおいては無補強・無緊張梁に比べ、緊張梁のひび割れ本数が少なくなっており、CFRPシートの緊張応力によってひび割れ発生が抑制された。ただし、最終的には緊張梁と無緊張梁は同様なひび割れ本数になっている。一方、最大ひび割れ幅に関しては無補強梁、無緊張梁、そして緊張梁の順で、次第に小さくなっている。特に最大ひび割れ幅については、荷重が60[kN]の時点でも緊張梁の最大ひび割れ幅は0.15[mm]と、他の2本に比べ著しく小さく、そして他の梁の破壊荷重よりも高い90[kN]においても0.5[mm]に過ぎない。

また、無補強梁は鉄筋の降伏後、新しいひび割れの発生はほとんど無くなり、徐々に梁が変形していくだけになった。一方、CFRPシートで補強された梁は緊張の有無に関わらず、多くの曲げひび割れが梁全体にわたって発生した。緊張梁のひび割れの発生が遅れるものの、両者にあまり極端な相違はみられなかった。2種類の供試体に関して、鉄筋降伏直後の最大ひび割れ幅、最大ひび割れ間隔および平均ひび割れ間隔の比較は表-9に示すとおりである。

c) 破壊性状の比較

表-8に示したように、各供試体の破壊形式は無補強梁が曲げ破壊、無緊張梁が剥離破壊、緊張梁がCFRP破断となった。ここで無緊張梁と緊張梁との

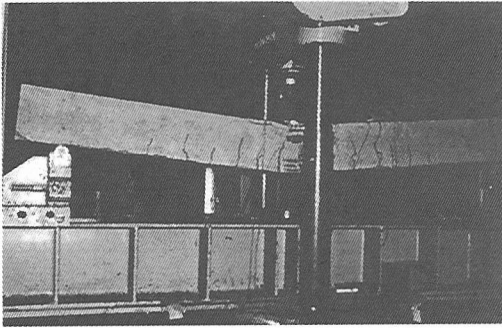


写真-6 曲げ破壊（無補強梁）

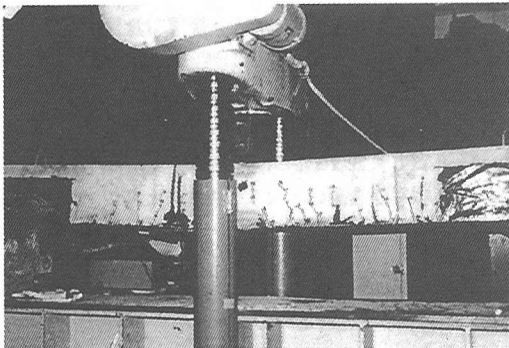


写真-7 剥離進展と端部定着剥離による破壊（無緊張梁）

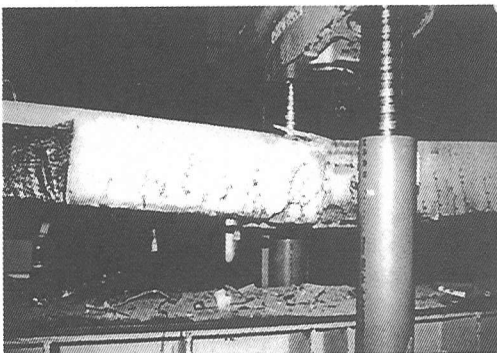


写真-8 剥離進展後に発生した端部近傍のCFRP 破断（緊張梁）

間に生じる異なる点としては、緊張梁と比較して無緊張梁は早い段階で剥離が発生し、ゆっくりと進展していったことがある。これに対し緊張梁の方は、最大荷重に達するまで剥離は起こらず、そして剥離発生後は急激に端部まで進展した。その後、端部付近においてCFRPシートの破断が起こり破壊に至った。この結果は、端部の完全な定着により、CFRPシートの能力を限界まで引き出せたことを示している。続いて各供試体の破壊の様子を写真6～8に示す。

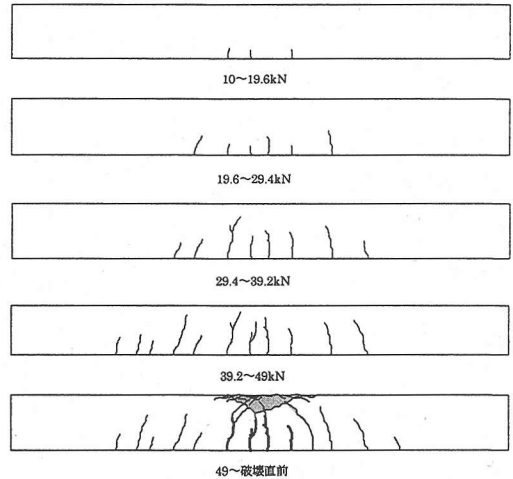


図-14(a) 各供試体の破壊プロセス（無補強梁）

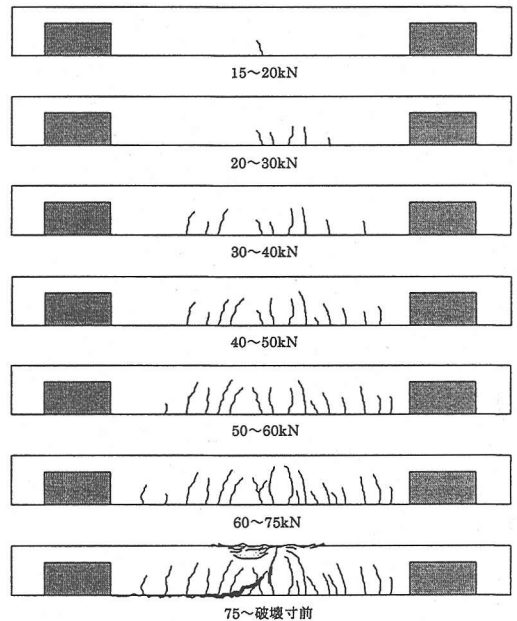


図-14(b) 各供試体の破壊プロセス（無緊張梁）

図-14(a)～(c)に各供試体のひび割れ図を示す。ひび割れ状況を比較すると、まず無補強梁の場合、曲げひび割れは梁全体にまばらに発生している。その後、ある程度曲げひび割れが発生した後は徐々に変形していくだけとなった。これに対して無緊張・緊張梁はCFRPシートの着着による拘束効果で、無補強梁よりも多くの曲げひび割れが発生し、梁全体に小さな間隔で広く分布していることがわかる。

また、各供試体の最終的な破壊の状況を見ると、すべての供試体において圧縮領域のコンクリート圧壊が発生している。

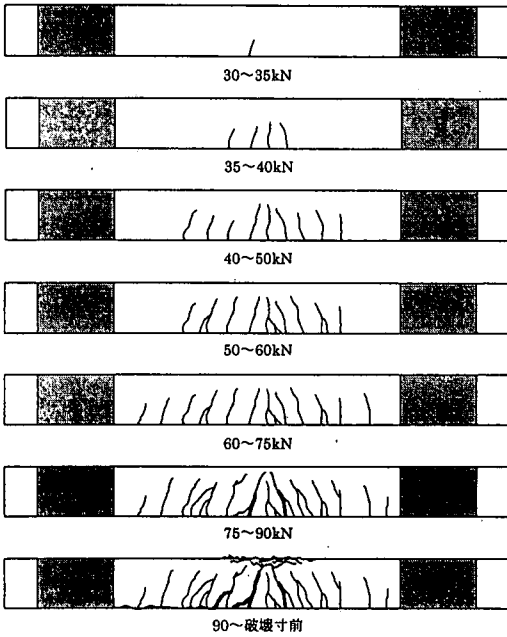


図-1 4 (c) 各供試体の破壊プロセス (緊張梁)

5. RC曲げ理論によるCFRPシート補強梁 曲げ耐力の算定

CFRP シートで補強された鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力は、剥離破壊を考慮しない場合、コンクリートや CFRP シートのひずみの限界値や設計強度などに対して規定を行った上で通常の鉄筋コンクリート方式で算定することができるかどうかを確認する。今回、本研究では CFRP シート補強梁の曲げ耐力を破壊モード別に算定し、実験結果との比較をした。

以下に、各破壊モードに対する断面の最大曲げモーメント M_u の算定式を示すとともに、図-1 5 に各種構造物の材料モデル、図-1 6 に CFRP シート補強梁断面のひずみ分布および応力分布を示す。

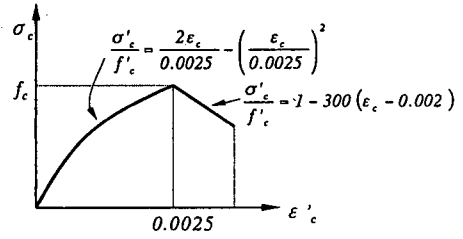
(1) 鉄筋降伏-FRP破断型

$$\frac{M_u}{bd^2 f'_c} = \frac{f_y}{f'_c} \rho_s \left(1 - \frac{\bar{y}}{d}\right) + \frac{E_f \varepsilon_f^*}{f'_c} \rho_f \left(\frac{h}{d} - \frac{\bar{y}}{d}\right) \quad (1)$$

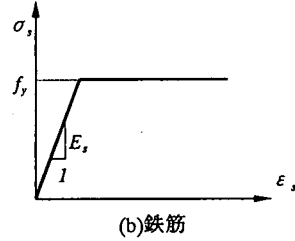
(2) 鉄筋降伏-コンクリート圧縮破壊型

$$\frac{M_u}{bd^2 f'_c} = \frac{f_y}{f'_c} \rho_s \left(1 - \frac{\bar{y}}{d}\right) + \frac{\sigma_f}{f'_c} \rho_f \left(\frac{h}{d} - \frac{\bar{y}}{d}\right) \quad (2)$$

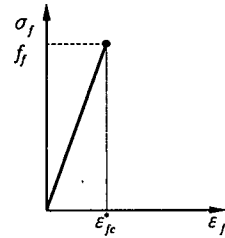
ここで、 ρ_s 、 ρ_f (A_f/bd) は主鉄筋の鉄筋比および曲げ補強用 FRP シートの補強比であり、 y は梁上縁からコンクリート圧壊応力の中心点までの距離であ



(a)コンクリートの1軸圧縮性状

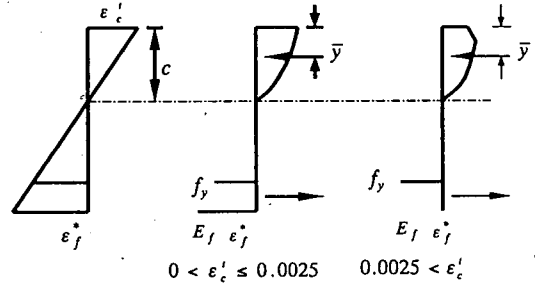


(b)鉄筋

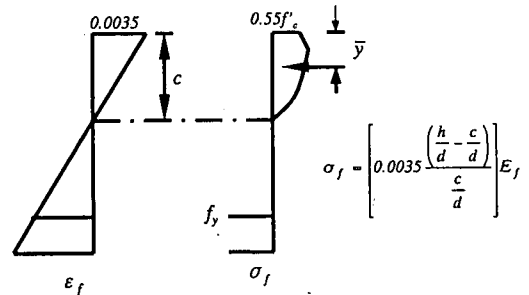


(c)FRPシート

図-1 5 各種構造物の応力ひずみ関係



(a)鉄筋降伏-FRP破断型



(b)鉄筋降伏-コンクリート圧縮破壊型

図-1 6 補強梁断面のひずみ分布および応力分布

表-10 終局曲げ耐力の比較

供試体	実験値 [kN]	計算値 [kN]	破壊形式
RC-0	57.8	57.1	—
RC-CP-1	77.5	78	C
RCS-CP-S2	95.8	98.6	C
RC-1, RC-2	63.7, 67.5	62.2	A
RCS-1, RCS-S1	73.5, 85	70.1, 111.4	A, A/E
RCS-CP-1	85	111.4	D

る。その他の記号については、図-15および図-16を参照されたい。また、コンクリートの圧縮終局ひずみは0.0035とする。

表-10に実験シリーズに関してRC曲げ理論で計算した結果と実験値との比較を示す。

今回用いた算定法では、無補強梁(RC-0)および、FRPシートが破断した供試体(RC-CP-1, RCS-CP-S2)においては、実験値と計算値がよく一致している。これは、供試体の破壊形式が鉄筋降伏-FRP破断型である場合においては、緊張の有無に関わらず、計算値と実験値とが一致することをあらわしている。しかし、CFRP剥離に伴う最終破壊の場合に関して、まず鉄筋が降伏した後にコンクリートの圧縮破壊とFRPシートの剥離が同時に進展していくというような破壊形式をした供試体(RC-1, RCS-1)では、鉄筋降伏-コンクリート圧縮破壊型の式で算出した結果、実験値とほぼ一致している。しかし、緊張梁(RCS-CP-1, RC-CP-2)や側面を補強した無緊張梁(RCS-S1)については、図-17に示すように鉄筋降伏後、CFRPシート破断前に大きなせん断ひび割れのずれ込みより発生した不安定CFRP剥離進展や曲げひび割れ端部より発生した不安定なCFRP剥離進展により破壊したため、鉄筋降伏-FRP破断型の式での計算結果では、供試体の耐力を過大算定した。そこで、今回は特に計算値と実験値とが合わなかった3本の供試体について、鉄筋降伏-コンクリート圧縮破壊型の式ではなく、実験で測定された供試体破壊時のCFRPシートの応力を用いて鉄筋降伏-FRP破断型の式によって再度算定を行った。その結果を表-11に示す。

この結果は、供試体がせん断ひび割れとこれに伴い発生するFRPシートの剥離により破壊する直前に得られたFRPシートのひずみ(実験値)に初期緊張応力より計算したFRPシートのひずみを加えた値を仮にFRPの破断ひずみ ϵ_{fc} とし、鉄筋降伏-FRP破断型の式により計算したものであるため、実験値

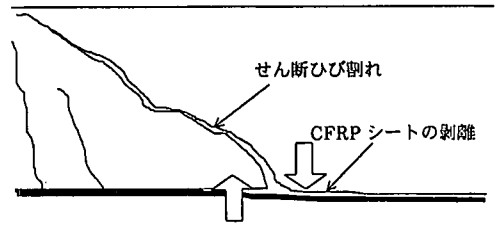


図-17 せん断ひび割れのズレ込みによるFRPシートの剥離進展

表-11 実験値と修正した計算値との比較

供試体	実験値 [kN]	計算値 [kN]	破壊形式
RCS-S1	85.0	83.8	A
RCS-CP-1	85.0	83.1	D
RC-CP-2	77.6	75.2	D

表-12 実験値と計算値との比較(実験シリーズ2)

供試体	実験値 [kN]	計算値 [kN]	破壊形式
無補強梁	57.4	57.4	曲げ破壊
無緊張梁	82.3	82.7	コンクリート圧壊・剥離破壊
緊張梁	97.3	98.6	CFRP破断

と計算値の一致が見られた。このことは、将来せん断ひび割れによるFRPシート剥離の耐力を予測することにも参考になるとと思われる。最後に実験シリーズ2の結果についても計算値との比較を表-12に示す。ここで、緊張梁は通常の鉄筋降伏-CFRP破断型で、無緊張梁も通常の鉄筋降伏-コンクリート圧縮破壊型で計算し、計算値と実験値の一致が見られた。

以上のことから、剥離破壊を除いて、CFRPシート補強やCFRPシート緊張補強による鉄筋コンクリート構造の曲げ耐力の算定は、既存のRC曲げ理論で十分可能であることが明らかである。

6. まとめ

本研究では、高強度・高弾性を有したCFRPシートをより有効に利用し、鉄筋コンクリート構造部材の曲げ補強効果、曲げ・せん断ひび割れの抑制効果を向上させるため、著者らが開発を進めているCFRPシート緊張接着による補強工法を発展させた。これまでの研究を踏まえながら、せん断特性を変化

させた鉄筋コンクリート梁に関して、CFRP シートを接着した無緊張梁と、さらに CFRP シートを緊張接着した緊張梁の曲げ試験を行い、次の知見が得られた。

- 1) CFRP シート緊張接着による補強は、無筋コンクリートだけでなく鉄筋コンクリート構造物へも十分な実用可能性と適用性をもっていることが確認できた。
- 2) CFRP シート緊張接着により、鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れ発生荷重、剥離発生荷重および終局曲げ耐力および剛性が向上することが改めて確認できた。また、ひび割れ幅の大幅な低減効果も実証された。
- 3) CFRP シート緊張接着による曲げ補強能力を十分に発揮するためには、曲げ耐力増加に見合うよう鉄筋コンクリート構造部材が十分なせん断耐力を有することが必要であると同時に、CFRP シートの端部定着を十分に確保しなければならない。
- 4) 本研究では、補強対象となる鉄筋コンクリート構造部材の有するせん断耐力と CFRP シートの補強量（枚数）およびその緊張応力の程度のバランスによって、構造部材の破壊モードが変化することがわかった。したがって、合理的に緊張接着補強を行うため、各種因子を統合し、最適な設計を行う必要がある。
- 5) CFRP シートで補強した鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力の算定は剥離破壊が生じない場合には、精度良く算定することが確認できた。一方、剥

離破壊が生じる場合、剥離発生時の FRP シートひずみ（実験値）を用いることによって、供試体の破壊耐力の算定ができた。したがって、構造物の補強設計を行うため、剥離破壊を防ぐ対策を考慮するか、剥離破壊の発生荷重を算定する方法を構築する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、田名部菊次郎氏、原田隆郎氏、邑山大悟氏にご協力いただいた、また、本研究は、平成9年度～平成10年度文部省科学研究費補助金（国際学術研究；09044129）の一部補助によって行われたものである。ここに、感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 呉 智深, 田名部菊次郎, 松崎智優, 神田 建, 福澤公夫, 岩松幸雄: FRP シート緊張によるコンクリート構造物の補強工法の開発, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, V-509, pp.1016-1017, 1997.9.
- 2) 呉 智深, 田名部菊次郎, 松崎智優, 神田 建, 横山功一: FRP シート緊張接着によるコンクリート構造部材の補強法の提案, 土木学会構造工学論文集, Vol.44A, pp.1299-1308, 1998.3.
- 3) Triantafillou, T. and Dskovic. : Innovative Prestressing with FRP Sheets, Mechanics of Short Term Behavior, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 7, No. 7, pp. 1652-1672, 1991.

(1999. 5. 10 受付)

STRENGTHENING EFFECTS ON RC BEAMS WITH EXTERNALLY PRESTRESSED CARBON FIBER SHEETS

Zhishen WU, Tomomasa MATSUZAKI, Kimio FUKUZAWA and Tatsuru KANDA

In this paper, a new method to use Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Sheets which are prestressed before they are bonded to the concrete surfaces based on the concept of prestressing technique is developed. An experimental program is carried out to verify the reinforcement effects of RC beams with prestressing CFRP sheets such as on the improvements of flexural strength, ductility, stiffness and crack resistance. An effort is made to investigate the different reinforcement effects for various RC beams with different ratios of flexural and shear capacities and structural optimization of reinforcement is also discussed in the paper. Finally, the adaptability of existing RC beam theory for calculating the flexural capacity of structures strengthened with prestressing CFRP sheets is examined.