

論文 CFRP 板による RC 補強部材の曲げ挙動

木村 耕三*1, 小島 克朗*2, 平田 亮*3, 土屋 好男*4

要 旨: 炭素繊維を収束・硬化させた炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 板を表面に貼り付けて補強した既存鉄筋コンクリート部材の曲げ性状を実験的に検討した。CFRP による補強部材は、いずれも鉄筋降伏後に補強材の剥離と、これに伴うコンクリートの圧壊によって終局状態に至ったが、CFRP による補強量が多いほど曲げ降伏荷重および剥離荷重が増大した。本論文では、実験結果に基づいて、CFRP 補強材の剥離荷重の算定式を提案し、その妥当性を検討した。

キーワード: 炭素繊維強化プラスチック, 剥離荷重, 曲げ補強, 鉄筋コンクリート

1. はじめに

軽量で高弾性・高強度の炭素繊維 (以下、CFと記す) を既存 RC 構造物の表面に貼り付けてせん断補強する工法は、阪神淡路大震災を契機に急速に普及してきた[1]。また、CF による既存 RC 部材の曲げ補強についても多くの実験が行われ、その補強効果が確認されている[2]。しかし、曲げ補強効果に大きな影響をおよぼすCF 補強材と既存コンクリートとの付着・定着性状については、まだ十分に解明されていないのが現状である[3],[4]。

本研究の目的は、CFを収束しエポキシ樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) 板およびCFシートを表面に貼り付けて補強したコンクリート部材の曲げ性状を把握し、CFRP 補強材の剥離荷重に対する算定式の提案とその妥当性を検討することである。

2. 曲げ補強実験

2.1 試験体

試験体は図-1 および表-1 に示すようにスラブを想定した幅 44.5 cm×高さ 14 cm×長さ 450 cm の RC部材の下面に、幅 4.8cm×厚さ 0.96 mm (CFRP板), 幅 4.2cm×厚さ 3.6mm (CFRP筋) の CFRP 補強材と幅 33cm×厚さ 0.11mmの CFを一方向に配したシート (CFシート) を長さ 160cmでそれぞれ所定量 (枚数) 貼り付けた補強部材 6 体と無補強部材 1 体の計 7 体である。RC 部材には上端、下端にそれぞれ曲げ補強筋 (2-D13) のみを配筋している。使用材料の特性は表-2 に示す通りである。CFRP 筋およびCFRP 板は PAN系炭素繊維をPultrusion 法で製造した補強材で、CFシートは単位面積 (m²) 当たり 200 g の CFを配したPAN 系の製品である。CFRP 筋およびCFRP 板は 2 液性エポキシ樹脂ベースのモルタル接着剤で、CFシートはプライマーを塗布した後、エポキシ樹脂によって、それぞれ既存コンクリートと接着した。いずれの試験体も接着後、室温で約 2 週間の養生を行った。

試験体のパラメータは、① CFRP 補強材による補強量と、② CF補強材の種類 (CFシート, CFRP 筋, CFRP板)、③ CFRP 補強材の厚さである。なお、CFRP 補強材の早期剥離を防止するために左右

*1 (株) 大林組技術研究所 構造第一研究室 主任研究員、工博 (正会員)

*2 (株) 大林組技術研究所 構造第一研究室 室長、工博 (正会員)

*3 東レ (株) ACM技術部 次長

*4 日本シーカ (株) 建材第一本部 マーケティングサービス部 主査

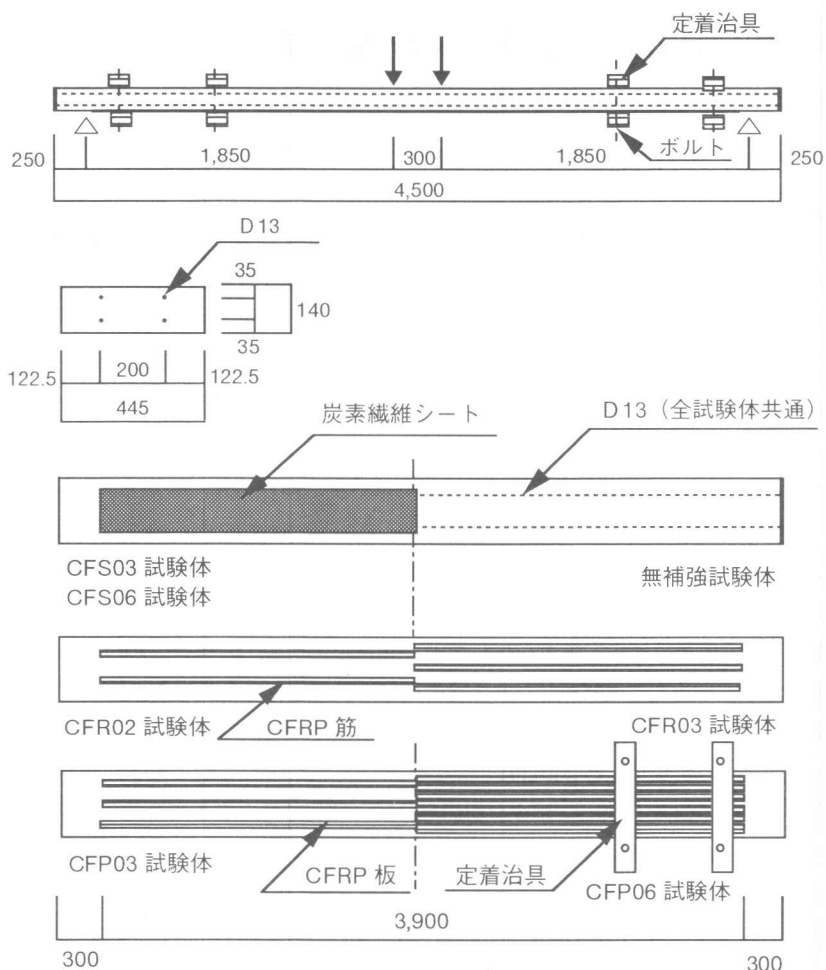


図-1 試験体の形状・寸法

両側の曲げせん断区間でそれぞれ2箇所、計4箇所定着を行った。CF補強材の定着は、試験体の上下面に幅15cm×高さ9.7cm×長さ60cmの鋼材を配し、両者をボルトで締め付ける方法で行なった。

2.2 試験方法

試験は、図-1に示すスパン400cmの単純支持中央2点集中荷重(純曲げ区間30cm)による1方向荷重で行ない、補強材のひずみおよび試験体中央での鉛直方向変位(たわみ)を測定した。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 破壊状況

無補強試験体では鉄筋の降伏後、変位の増大に伴って加力点近傍でコンクリートが

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材の種類	補強量*1 (断面積 cm ²)	補強比*2 ΣAE/(AE) _s
RC	無補強	—	1.00
CFR02	CFRP筋	2枚@200 (3.02)	1.68
CFR03	CFRP筋	3枚@150 (4.54)	2.02
CFP03	CFRP板	3枚@150 (1.38)	1.41
CFP06	CFRP板	6枚@75 (2.76)	1.82
CFS03	CFシート	3層貼付 (1.09)	1.53
CFS06	CFシート	6層貼付 (2.18)	2.06

*1 CFRP筋、CFRP板は樹脂を含んだ値、CFシートはCFの実断面積の値

*2 補強前に対するCFRPを含んだ補強後の補強筋量(断面積×弾性係数)の比

表-2 使用材料の特性

材料名	形状寸法 (mm)	破断荷重 (tf)	引張強度 (tf/cm ²)	弾性係数 (tf/cm ²)
CFRP筋	42×3.60	25.70	17.0	1,200
CFRP板	48×0.96	12.47	27.1	1,590
CFシート	330×0.11	10.89	30.0	2,590
材料名	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (tf/cm ²)	降伏強度 (tf/cm ²)	引張強度 (tf/cm ²)
コンクリート	416	276	—	—
鉄筋 D13	—	1,990	3.53	5.36

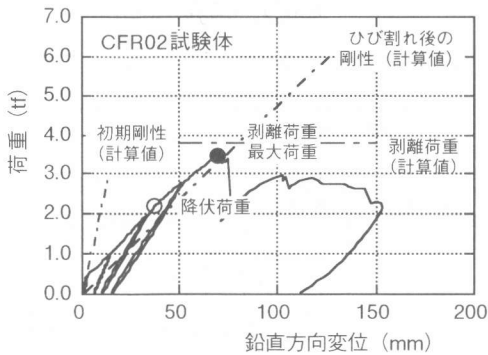


図-2 荷重～変位（たわみ）関係

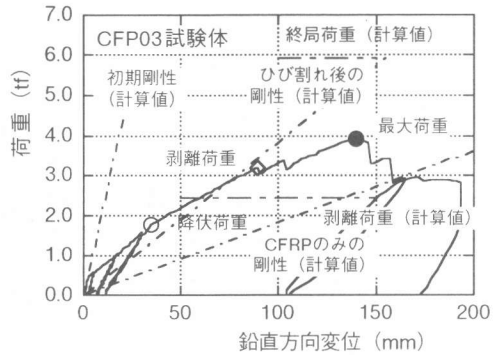


図-3 荷重～変位（たわみ）関係

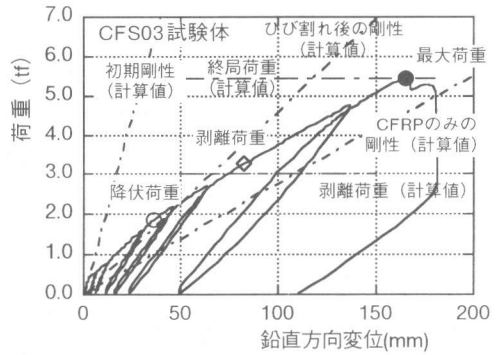


図-4 荷重～変位（たわみ）関係

圧壊し、終局状態に至った。これに対して、CFRP 補強材で補強した試験体では、鉄筋の降伏後、補強材の剥離を生じたが、定着の効果によって、さらに荷重と変位が増大し、補強材の滑り（はがれ）と、これに伴うコンクリートの圧壊により終局状態に至った。

2.3.2 変位性状

CFRP による補強後の最大荷重（計算値）に近い値となっている CFR02、CFP03、CFS03 試験体中央での鉛直方向変位と荷重の関係を図-2～図-4、各試験体の荷重～変位関係の包絡線を図-5、6 に示す。この結果、曲げひ

び割れ発生後および鉄筋降伏後の剛性は、鉄筋量に対するCFRP の補強量が多い（補強比が大きい）ほど高くなっている。また、鉄筋降伏後の剛性は、CFRP のみの剛性（計算値）と近似している。なお、ひび割れ後の剛性（計算値）は、引張側のコンクリートを無視して求めた値で、終局荷重（計算値）は後述する e 関数法で求めた値である。

2.3.3 ひずみ性状

CFP03、CFS03 試験体での荷重～ひずみ関係を図-7 および図-8 に示す。CFRP で補強した試験体で

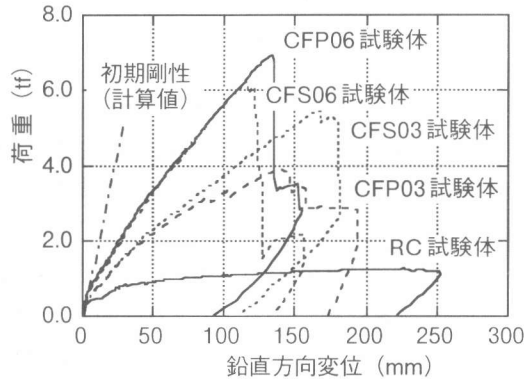


図-5 荷重～変位関係 (CFRP板とCFシートの比較)

は、鉄筋の降伏まで CFRP 補強材と鉄筋のひずみ性状は類似しているが、降伏荷重後は、荷重の増大に対して鉄筋のひずみ増分が見られず、CFRP 補強材のひずみのみが増大している。その後、CFRP 補強材の剥離によって、鉄筋のひずみが急増する。このことから、鉄筋降伏後の荷重増分はすべてCFRPが負担しており、鉄筋の塑性化の進行は生じていない。CFRP補強材の剥離時のひずみの値に

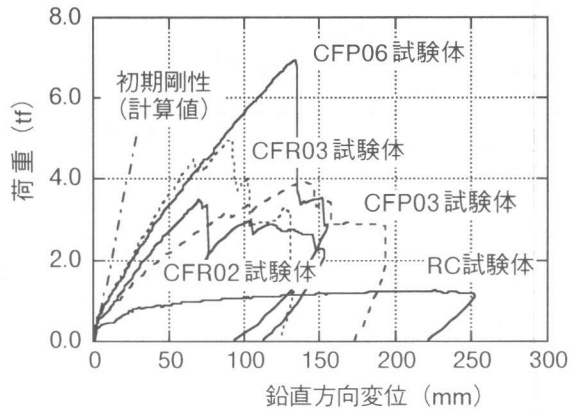


図-6 荷重～変位関係 (CFRP 板とCFRP 筋との比較)

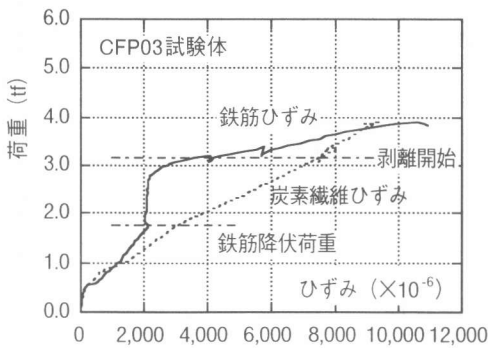


図-7 荷重～ひずみ関係

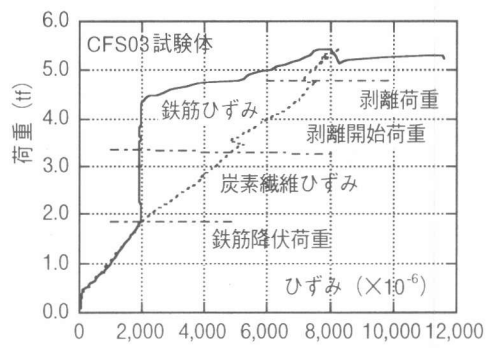


図-8 荷重～ひずみ関係

については、補強材の種類による顕著な差は見られず $6,000 \sim 8,000 \times 10^{-6}$ となっている。また、CFRP 補強材の軸方向のひずみ分布は、鉄筋の降伏荷重までは上に凸の分布を示しているが、CFRP 補強材の剥離後は両端部を除いて全体に一律のひずみ分布 (台形状) となっている。

2.3.4 諸荷重

各試験体の諸荷重を表-3 に示す。降伏荷重は、図-9 に示すようにCFRP 補強材の貼り付け量に比例して増大している。なお、図-9の縦軸は、無補強試験体に対する補強試験体の降伏荷重の比 (以下、降伏荷重比) で、横軸は既存の鉄筋による補強量(AE)_sに対するCFRPによる補強後の全補強量(AE)の比 (以下、補強比) で、それぞれ無次元化している。また、図中には既往のデータ[5]も合わせてプロットした。この結果、補強試験体の降伏荷重 (P_y) は無補強試験体の降伏荷重 (P_{sy}) に対して後述する式(2)で近似することが出来ると考えられる。

剥離荷重は、いずれの試験体でも降伏荷重を上回っており、式(1)で求めた剥離荷重時のCFRP 補強材とコンクリートとの接着 (付着) 強度 τ_{cf} は $3 \sim 12 \text{ kgf/cm}^2$ で補強材の種類によって若干異なっている。すなわち、CFRP 補強材の表面に凹凸を設けたCFRP 筋を補強材としたCFR02, CFR03 試験体では接着強度が高くなっている。しかし、補強材の板厚の大きいCFRP 筋では鉄筋降伏からCFRP 補強材の剥離までの荷重の増大は他の補強材に比べて少ない。なお、(1)式は、CFRP補強材による負担曲げモーメント [(補強試験体での剥離荷重時のモーメント) - (鉄筋コンクリートによる曲げ降伏モーメント)]

表-3 諸荷重の一覧

試験体名	曲げひび割れ荷重 (tf)	曲げ降伏荷重 (tf) *1	剥離開始荷重 (tf)		接着強度*4 (kgf/cm2)	最大荷重 (tf)	
			計算値*2	実験値*3		計算値	実験値*3
RC	0.33	0.88 (1.00)	—	—	—	1.35	1.26 (0.93)
CFR02	0.50	2.19 (2.49)	3.81	3.47 (0.91)	12.25	7.64	3.47 (0.45)
CFR03	0.65	3.01 (3.42)	5.90	4.46 (0.76)	11.37	10.13	4.98 (0.49)
CFP03	0.49	1.77 (2.01)	2.46	3.21 (1.30)	6.41	5.94	3.91 (0.66)
CFP06	0.64	2.67 (3.03)	4.61	6.11 (1.33)	7.31	9.33	6.96 (0.75)
CFS03	0.44	1.86 (2.11)	3.03	3.27 (1.08)	2.87	5.41	5.44 (1.01)
CFS06	0.55	2.78 (3.16)	6.17	6.29 (1.02)	6.60	9.12	6.29 (0.69)

*1) 括弧の値はRC試験体（無補強）での降伏荷重（実験値）に対する比

*2) 式(4)による計算値

*3) 括弧の値は計算値に対する実験値の比

*4) 式(1)による計算値

ト)] から求めたCFRP補強材の曲げ引張荷重を接着面積で除したものである。

$$\tau_{cf} = \frac{(1.14 \times Q - at \cdot f_y \cdot d / L)}{b \cdot cf \cdot D} \quad (1)$$

ここで、Q：せん断力、L：CFRP補強材の貼付（定着）長さ、at、fy：鉄筋の断面積および引張降伏強度、D、d：鉄筋コンクリートの全せい、有効せい、b、cf：CFRP補強材の貼付幅

また、図-10は、各補強試験体での降伏荷重（Py）に対する剥離荷重の比と補強比の関係で、両者の関係は式(3)で近似できる。したがって、式(2)と式(3)から、補強試験体の剥離荷重（Pp）は、無補強試験体の降伏荷重（Psy）を用いて式(4)で求めることが出来る。なお、本提案式は通常の既存RC部材のCFRP補強に対して適用可能であると考えられる。

$$P_y = (2.0 \times K - 1) \times P_{sy} \quad (2)$$

$$P_p = 1.0 \times K \times P_y \quad (3)$$

$$P_p = (2.0 \times K - 1) \times K \times P_{sy} \quad (4)$$

ここで、K：補強比、Py、Psy：

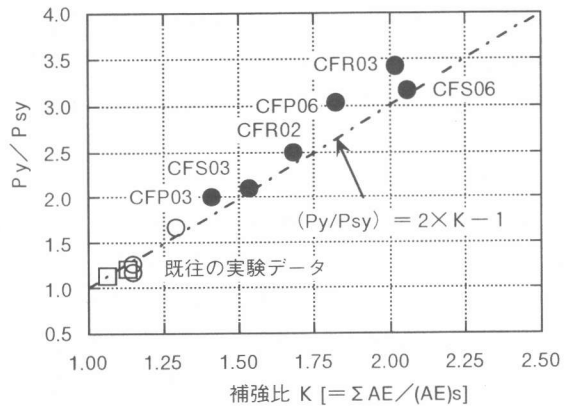


図-9 降伏荷重比と補強比の関係

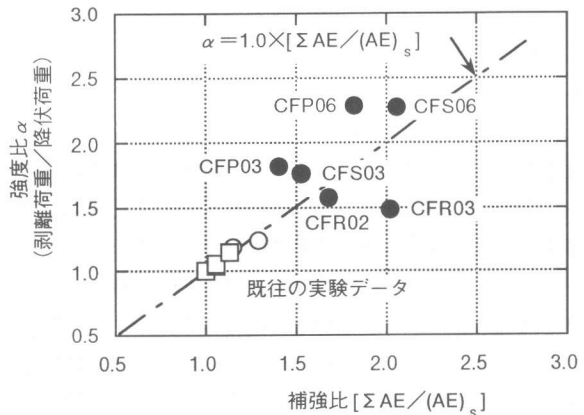


図-10 強度比と補強比の関係

補強及び無補強試験体の降伏荷重

P_p : 補強試験体の剥離荷重

図-11は実験値と式(4)による計算値を比較したもので、両者は概ね近似していると言える。なお、図中には既往のデータ[5],[6]も合わせて示した。

補強試験体の最大荷重は、各試験体の剥離荷重の1.0～1.66倍(平均1.19倍)で、無補強試験体の最大荷重に対して2.75～5.55倍となっている。また、表-2の材料特性を用いてコンクリートの応力～ひずみ関係を e 関数で近似した非線形解析による終局荷重を

最大荷重の計算値として表-3に示した。この解析では、CFRP補強材とコンクリートは終局時まで一体性を確保するものと仮定し、両者の剥離は考慮していない。この結果、実験値は計算値の0.45～1.01倍となっている。剥離荷重に対する最大荷重の比および計算による終局荷重に対する実験値の比が小さい原因として、定着治具による締付力が十分でなかったことが考えられる。

3. まとめ

既存RC部材の下面にCFRP補強材を貼り付けた補強部材の曲げ実験の結果、①CFRP板をRC部材に貼り付けることにより、また補強量を増すことによってRC部材の曲げ降伏荷重と剥離荷重を増大させることが出来る、②CFRP筋と他のCFRP補強材を比較すると、補強材の厚さが厚くなると降伏荷重に対する剥離荷重の比が小さくなる傾向がある、③CFRP補強材の剥離荷重は、無補強部材の降伏荷重と補強比を用いて評価することが出来る、ことが明らかになった。したがって、CFRP補強材による曲げ補強では、定着が重要な要因となるが、式(4)で求めた剥離荷重に使用部位、荷重条件等に対する安全率を考慮して補強設計を行うことが出来る。今後、必要な定着力(締め付け力)の把握と有効な定着方法の検討が必要であると考えられる。

【参考文献】

- [1] 小島克朗：炭素繊維を用いた既存構造物の耐震補強－(財)日本建築防災協会の技術評価工法の概要と施工例－，建築防災，pp.2-17, 1995.10
- [2] 木村耕三、小島克朗：シート状炭素繊維による既存鉄筋コンクリートの曲げ補強，土木学会連続繊維補強材のコンクリート構造物に関するシボジウム講演論文報告集，pp.119-122, 1992.4
- [3] 木村耕三、小島克朗、大野了：炭素繊維シートとコンクリートとの付着・定着性状に関する研究，構造工学論文集 Vol. 41B, pp.527-536, 1995.
- [4] 佐藤裕一、木村耕三、小島克朗：CFRP補強コンクリート部材におけるCFRPシート接着面の挙動について，第5回複合材料界面シンポジウム要旨集，pp.209-213, 1996.5
- [5] 木村耕三、小島克朗、平田亮、土屋好男：CFRP板による既存RCはりの曲げ補強，第40回日本学会材料連合講演会講演前刷集，pp.216-217, 1996.9
- [6] CRS研究会技術資料 NO.4；多積層のシート状CFRPで補強したRC部材の曲げ性状，1993年9月

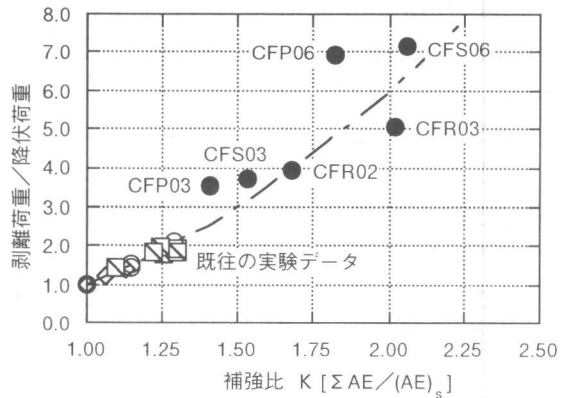


図-11 剥離荷重と補強比の関係