

論文 CFRP 成型板を用いた既存 RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究

久部 修弘*1・矢野 努*2・横山 剛*2・益尾 潔*3

要旨：本研究は、高強度タイプおよび曲げ補強効率に優れた高剛性タイプの CFRP 成型板を用いた RC 部材の曲げ補強効果について実験的検討を行ったものである。CFRP 成型板の付着長さや補強量等をパラメータとした RC 梁の静的載荷実験を実施した。実験結果より、CFRP 成型板の最大ひずみは、CFRP 成型板有効付着長ささと貼付け長さとの比で表されることを確認した。また、CFRP 成型板で補強した RC 梁試験体の曲げ終局耐力の評価を行った。その際、せん断破壊が起こらないことも確認した。

キーワード：CFRP 成型板，曲げ補強，RC 梁，付着長さ，曲げ耐力，せん断耐力

1. はじめに

既存コンクリート部材において、供用条件の変更に伴い積載荷重が増加すると、梁やスラブの曲げ補強が必要となる場合がある。近年、このような場合の補強工法の一つとして CFRP 成型板による曲げ補強の事例が増加しつつある（写真 - 1）。この工法は引抜き成型法によって炭素繊維を一方向に配し、エポキシ樹脂を含浸・硬化させた CFRP 成型板をパテ状のエポキシ樹脂を用いてコンクリート表面に接着、補強するものであり、含浸脱泡作業のある炭素繊維シート工法に比べて品質の安定、施工性の向上、工期短縮等の特徴を有している。

本研究では、図 - 1 に示すようにこれまで研究事例¹⁾のある高強度タイプ（弾性係数 156kN/mm²）と、最近開発された高剛性タイプ（弾性係数 450kN/mm²）の 2 種類の CFRP 成型板を用いた。特に、この高剛性タイプの成型板は鋼材の約 2.3 倍の弾性率を有しており、長期荷重下の曲げ補強に対しては、高強度タイプより高い応力低減効果が期待できると考えられる。これらの CFRP を用いた曲げ載荷実験結果を基に、CFRP 成型板の最大ひずみを評価し、CFRP 成型板で補強した試験体の曲げ終局



写真 - 1 CFRP 成型板による RC 造倉庫スラブ（下面）補強事例

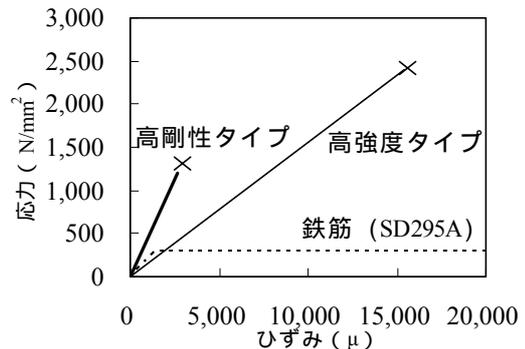


図 - 1 本研究に用いた CFRP 成型板の 応力 - ひずみ関係

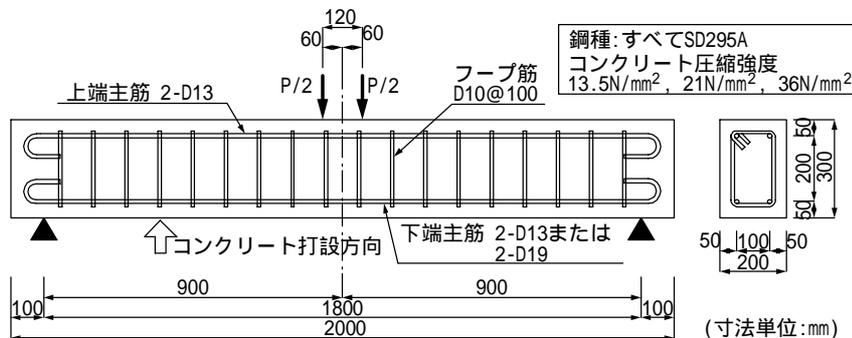


図 - 2 試験体形状寸法および配筋

*1 三菱化学産資（株） 炭素繊維事業部（正会員）
 *2（株）コンステック 補強技術本部
 *3（財）日本建築総合試験所 試験研究センター 工博（正会員）

表 - 1 試験体一覧

引張側 主筋 (pt(%))	種別	Fc (N/mm ²)	CFRP 成型板諸元			試験体名称
			枚数 (枚)	厚さ (mm)	全長 (mm)	
2-D13 (0.51)	無補強	13.5	-	-	-	C13D13
		21	-	-	-	C21D13
		36	-	-	-	C36D13
	高強度 (G) タイプ	21	1	1	1660	C13D13-G51L
					1660	C21D13-G51L
					1120	C21D13-G51S
		2	2	1660		C21D13-G52L
						C21D13-G52L-W
		36	1	1	1660	C36D13-G51L
	高剛性 (H) タイプ	21	1	2	1660	C13D13-H52L
					1120	C21D13-H52S
					1660	C21D13-H52L-W
36		1	2	1660		
						C36D13-H52L
2-D19 (1.15)	無補強	21	-	-	-	C21D19
	高強度		1	1	1660	C21D19-G51L
	高剛性		1	2	1660	C21D19-H52L

表 - 2 コンクリート強度

Fc (N/mm ²)	B (N/mm ²)	Ec (kN/mm ²)
13.5	15.4	22.0
21	22.5	25.2
36	44.3	31.3

Fc : 目標圧縮強度, Ec : 弾性係数

B : 圧縮強度 (各水準 3 ~ 6 体平均値)

表 - 3 CFRP 成型板 (規格値)

	高強度 タイプ	高剛性 タイプ
E _f (kN/mm ²)	156	450
T _f (N/mm ²)	2,400	1,200

E_f : CFRP 成型板弾性係数, T_f : 同引張強度

表 - 4 エポキシ樹脂接着剤 (規格値)

引張強度 (N/mm ²)	20
引張せん断強度 (N/mm ²)	10
圧縮強度 (N/mm ²)	50
圧縮弾性率 (N/mm ²)	1000

耐力とせん断余裕度を算出するとともに、実験結果との比較を行い、曲げ終局耐力式の評価を行った。

2. 実験因子

2.1 試験体

(1) 試験体の形状寸法

試験体の形状寸法・配筋およびスパンを図 - 2 に示す。曲げ補強を行うことを考慮して、せん断補強筋比は 0.71% とした。また、コンクリート強度の低い面を補強することで、安全側の評価となると考え、コンクリート打設時のコテ仕上げ面を補強面とした。

(2) 試験体種類

本研究では、表 - 1 に示すように高強度タイプおよび高剛性タイプの CFRP 成型板について、それぞれ引張鉄

筋量、コンクリート強度、CFRP 成型板補強量 (厚さ、枚数) と貼付長さをパラメータとした実験とした。

(3) 使用材料

実験に供したコンクリートの強度試験結果を表 - 2 に示す。鉄筋は全て SD295A を用いた。CFRP 成型板の品質規格値を表 - 3 に示す。これらは CFRP 成型板の幅 × 厚さとして算出した見かけの断面積に対する値である。エポキシ樹脂接着剤の品質規格値を表 - 4 に示す。

(4) CFRP 成型板貼付方法

補強するコンクリート表面をディスクサンダーでケレンし、エポキシ樹脂接着剤をコンクリート表面および CFRP 成型板上に塗布 (合計塗布量 0.5kg/m) 後、CFRP 成型板をコンクリート表面に圧着した。

2.2 載荷方法

載荷は図 - 3 に示すように、試験体両端をピン・ローラーで支持し、中央部 2 点に鉛直荷重を加えて行った。

3. 荷重 - 変位関係および破壊性状

試験結果の一覧を表 - 5 に示す。補強を施した何れの試験体も CFRP 成型板の剥離で最大耐力が決定した。

3.1 高強度タイプ

高強度タイプの代表的な破壊状況を写真 - 2 に、荷重 - 変位関係を図 - 4 に示す。破壊形式 B は加力点直下の曲げひび割れ近傍から CFRP 剥離が進展した CFRP 剥離

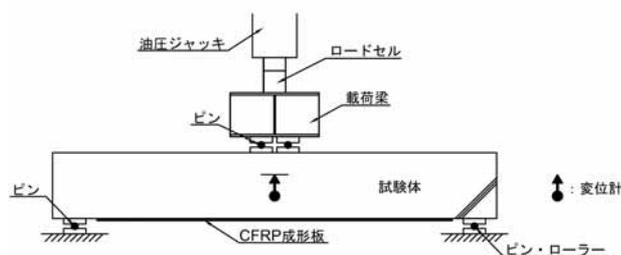


図 - 3 載荷方法

破壊型であり、破壊形式 S はせん断ひび割れから進展した引張鉄筋部付着割裂ひび割れ近傍の CFRP 剥離破壊型である。CFRP 成型板貼付長さが 1660mm および 1120mm の試験体を比較 (図 - 4 a) すると、貼付長さが長いもののほうが若干曲げ剛性が大きかったものの、最大耐力の明瞭な差はみられなかった。また、貼付長さが短いものは CFRP 成型板末端部の外側で曲げせん断ひび割れが観察された。CFRP 成型板厚さの影響 (図 - 4 b) に関しては、1mm のものに比べて 2mm のほうが曲げ剛性・最大耐力ともに大きくなった。さらに CFRP 成型板の枚数を 1 枚 2 枚に増加させたもの (図 - 4 c) に関して、ひび割れ発生以降の曲げ剛性が増加するものの、破壊形式はせん断ひび割れから進展した引張鉄筋部付着割裂ひび割れ近傍を起点とする CFRP 剥離破壊 (写真 - 2 破壊形式 S) となった。CFRP 成型板 2 枚の最大耐力は無補強試験体の降伏耐力の 2.7 倍まで向上した。

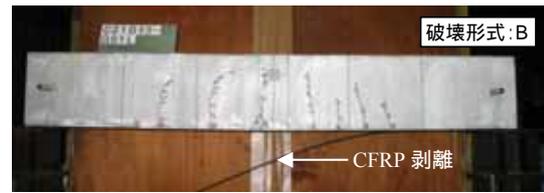
3.2 高剛性タイプ

高剛性タイプの代表的な破壊状況を写真 - 3 に、荷重 - 変位関係の例を図 - 5 に示す。破壊形式 BS はスパン中央から 1D の曲げせん断ひび割れ近傍における CFRP 剥離破壊型である。CFRP 成型板貼付長さが 1120mm および 1660mm の試験体の最大耐力 (図 - 5 a) は、無補強試験体の降伏耐力のそれぞれ 1.7 倍および 2.2 倍で、CFRP 成型板貼付長が長いほうが大きい結果となった。高強度タイプと違い、CFRP 成型板貼付長さが 1120mm の剛性は、荷重が $P=40\text{kN}$ 以降において 1660mm の試験体より小さい。これらの試験体について写真 - 3 に示すように $P=72\text{kN}$ 時のひび割れ幅に着目すると、C21D13-H52S は CFRP 成型板末端部付近のひび割れ (0.35, 0.40mm 幅; 写真 - 3 参照) が他のひび割れ (0.04 ~ 0.08mm 幅; 同写真

表 - 5 試験結果一覧

試験体名称	曲げひび割れ発生荷重(kN)	鉄筋降伏荷重(kN)	最大荷重(kN)
C13D13	11.9	42.2	66.2
C21D13	12.0	42.9	64.8
C36D13	10.1	40.7	69.2
C13D13-G51L	14.1	61.0	72.5
C21D13-G51L	19.9	61.2	73.4
C21D13-G51S	18.0	59.0	69.6
C21D13-G52L	17.9	73.3	97.2
C21D13-G52L-W	18.0	97.4	135.7
C36D13-G51L	14.0	57.0	69.1
C13D13-H52L	20.1	108.5	108.5
C21D13-H52L	18.0	108.5	109.6
C21D13-H52S	20.1	56.8	87.8
C21D13-H52L-W	36.9	- ¹⁾	118.5
C36D13-H52L	22.2	102.6	120.0
C21D19	15.0	88.0	142.5
C21D19-G51L	15.0	110.2	135.1
C21D19-H52L	20.1	121.2	135.2

1: 鉄筋降伏前に CFRP 剥離によって破壊



C21D13-G51L



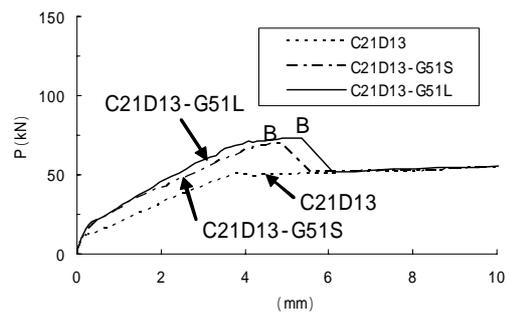
C21D13-G52L-W

【破壊形式】

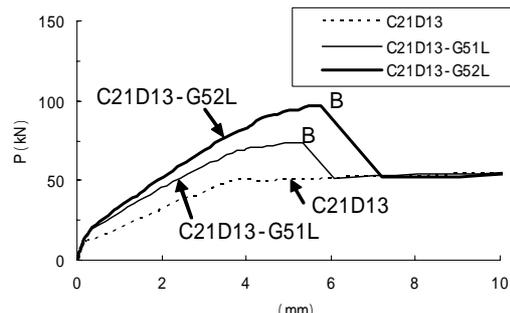
B: 加力点直下の曲げひび割れ近傍の CFRP 剥離破壊型

S: せん断ひび割れから進展した引張鉄筋部付着割裂ひび割れ近傍の CFRP 剥離破壊型

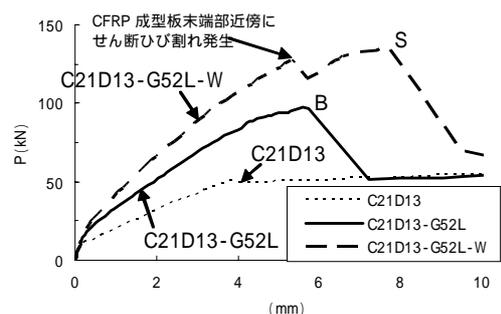
写真 - 2 高強度タイプの代表的な破壊状況



(a: CFRP成型板貼付長さの影響)



(b: CFRP成型板厚さの影響)



(c: CFRP成型板枚数の影響)

図 - 4 高強度タイプの荷重 - 変形関係

参照) に比べ早期に進展したことが確認されている。この結果、荷重 - 変位関係における剛性の低下が認められたと考えられる。

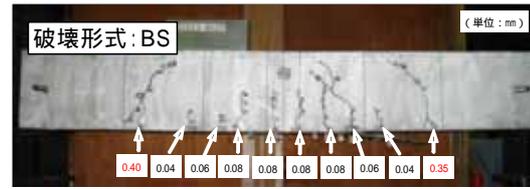
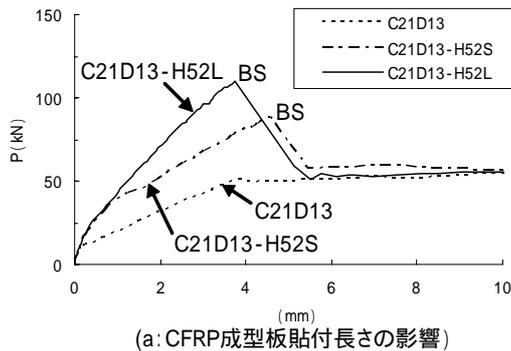
図 - 5 b に示すように、CFRP 成型板 2 枚貼付試験体の曲げひび割れ発生以降の剛性は 1 枚貼付試験体より大きくなったが、2 枚貼り試験体の破壊形式は、CFRP 成型板末端部でのせん断ひび割れから進展した引張鉄筋部附着割裂ひび割れ近傍を起点とする CFRP 剥離破壊型であった。CFRP 成型板 2 枚貼付試験体の最大耐力は無補強試験体の降伏耐力の約 2.6 倍で、1 枚貼付試験体より若干大きな結果となった。

コンクリート圧縮強度の影響について、表 - 5 中の $F_c=13.5$ (C13D13-H52L) および $F_c=36$ (C36D13-H52L) の比較を行うと、最大耐力において無補強試験体降伏耐力のそれぞれ 2.57 倍(108.5/42.2) および 2.95 倍(120.1/40.7) となり、 $F_c=36$ の試験体の方が大きい結果となった。

4. 曲げ補強効果の評価

4.1 CFRP 成型板附着長さの評価

CFRP 成型板の必要附着長さの設定を行うために、ま



(C21D13-H52S, P=72kN 時)

CFRP 両端部付近のひび割れ幅が特に進展している事例)



(C21D13-H52L-W)

【破壊形式】

BS: スパン中央から 1D の曲げせん断ひび割れ近傍における CFRP 剥離破壊型

S: せん断ひび割れから進展した引張鉄筋部附着割裂ひび割れ近傍の CFRP 剥離破壊型

写真-3 高剛性タイプの代表的な破壊状況

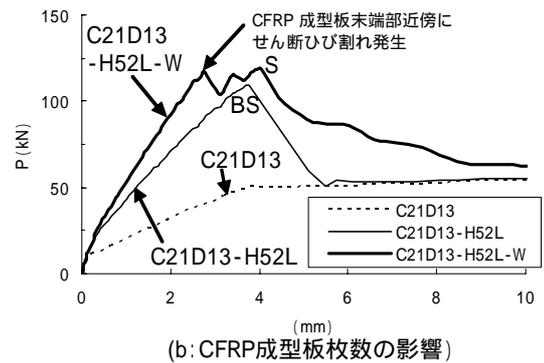


図 - 5 高剛性タイプの荷重 - 変位関係

ずコンクリート強度や CFRP 断面剛性によって構成されている CFRP 板附着指標²⁾を算出し、前章の曲げ試験結果で得られた CFRP 成型板最大ひずみとの関係で整理を行った(1式)。曲げ試験の結果からはコンクリート強度と CFRP 断面剛性のみ変化させた試験体を抽出している。図 - 6 に示すようにこれらの要因と最大ひずみとの関係に相関が認められ、最大ひずみは概ね高強度タイプで 4000 μ 、高剛性タイプで 2000 μ であった。

$$\lambda_f = \frac{E_f \cdot t_f}{\tau_{b,max}} \quad (1)$$

$$\tau_{b,max} = 2.5\sigma_B^{0.23} \quad (2)$$

ここで、 λ_f : CFRP 板附着指標、 E_f : CFRP 成型板の弾性係数、 t_f : 同厚さ、 $\tau_{b,max}$: 局所最大附着応力

次に、この CFRP 成型板附着指標 (λ_f) から算出され

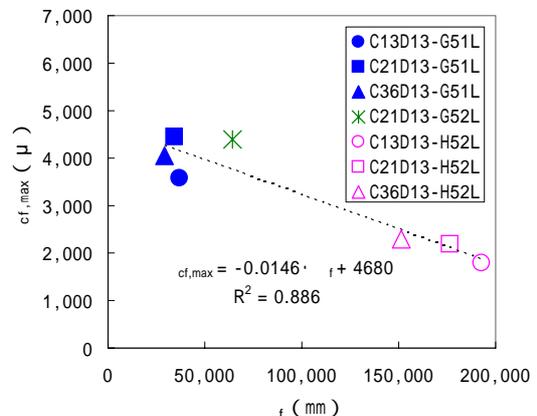


図 - 6 CFRP 成型板附着指標と曲げ試験における最大ひずみ

る有効付着長さ算出式²⁾(3式)を用いて、各要因における有効付着長さを算出した。

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot s_e}{k_e}} \quad (3)$$

ここで、 l_e ：2面せん断試験の有効付着長(=173mm~460mm)、 s_e ：有効付着域の局所すべり量(=0.234mm)、 k_e ：等価付着ストレスブロック応力係数(=0.428)

この有効付着長さ算出式は2面せん断試験結果から算出されたものであり、本検討のような曲げ試験時と条件が異なっているため、ここでは有効付着長さ(l_e)と曲げ試験における加力点からのCFRP成型板貼付け長さ(l_{cf})との比(l_{cf}/l_e =CFRP成型板貼付け長さ比)を用いて検討する。

図-7にCFRP成型板最大ひずみと貼付け長さ比(l_{cf}/l_e)の関係を示す。データは本曲げ試験における破壊形式がB、BSのものを用いた。B・BS型で剥離破壊した結果の下限をとると、CFRP成型板の最大ひずみは(4)式の直線を下限值として表すことができる。

$$\varepsilon_{cf,max} = 940 \cdot \frac{l_{cf}}{l_e} \quad (4)$$

この結果より、高強度タイプの最大ひずみ4000 μ を確保するには、最大モーメント位置から4.26 $\cdot l_e$ 以上の貼付け長さが、高剛性タイプで2000 μ を確保するには、同様に2.13 $\cdot l_e$ 以上の貼付け長さが必要となる。

また、図-8は図-7に炭素繊維シートおよびCFRP成型板に関する既往の報告^{1),3)-5)}もあわせてプロットしたものである。なお、炭素繊維シートの有効付着長さは既往の文献⁶⁾を参考にした。この結果より、既往の炭素繊維シートの結果を付加したのものについても同様の傾向を示しており、本検討方法は炭素繊維シートやCFRPプレートの剥離破壊を安全側に評価できる一手法と考えられる。

4.2 曲げ耐力の検討

試験体の曲げ終局耐力(P_{mu})は文献⁷⁾の曲げ終局耐力略算式を用い、既存RC部材の曲げ耐力にCFRP成型板による曲げ耐力向上分を付加し、CFRP成型板の剥離によって耐力が決定するものとした。ここで、CFRP成型板の有効ひずみは(4)式のCFRP成型板最大ひずみ算出式を用いた。また、せん断終局耐力(P_{su})の評価式は、荒川min式によるせん断終局耐力計算式を用いた。

$$P_{mu} = \frac{2 \cdot M_{mu}}{a} \quad (5)$$

$$M_{mu} = 0.9 \cdot (a_t \cdot \sigma_y \cdot d + E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f \cdot D) \quad (6)$$

ここで、 a ：加力点と支持点間の距離、 a_t ：引張鉄筋断

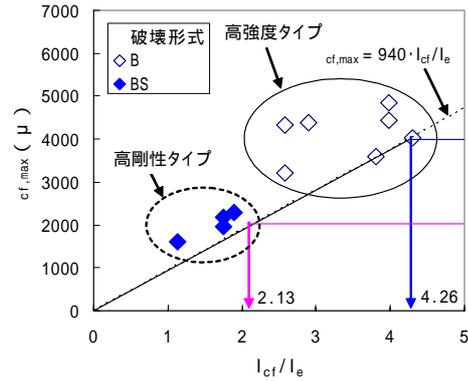


図-7 CFRP成型板貼付け長さ比と最大ひずみとの関係 (本研究B,BSの結果のみ)

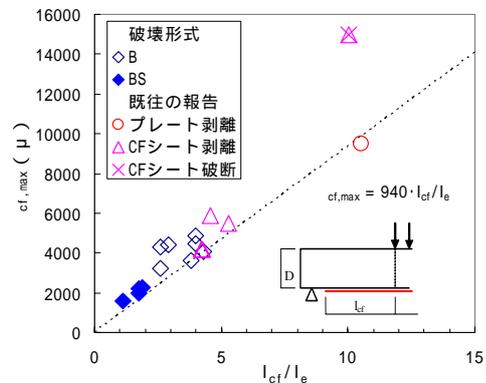


図-8 CFRP成型板貼付け長さ比と最大ひずみとの関係 (既往の結果含む)

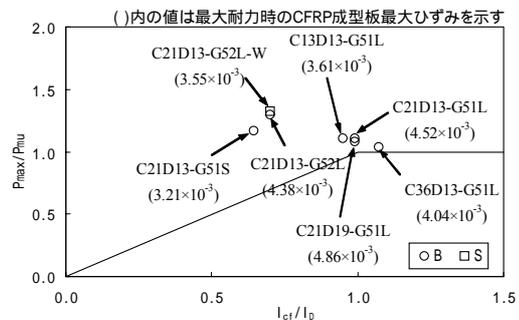


図-9 曲げ破壊安全度 - 付着長さ余裕度関係 (高強度タイプ)

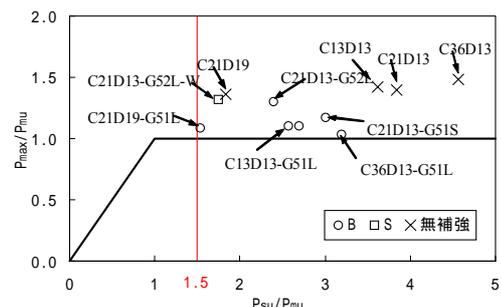


図-10 曲げ破壊安全度 - せん断余裕度関係 (高強度タイプ)

面積, σ_y : 引張鉄筋の降伏強度, d : 有効せい, E_f : CFRP 成型板の弾性係数, A_f : CFRP 成型板の断面積, D : 梁せい, ε_f : CFRP 成型板有効ひずみ (ただし必要貼付け長さが確保された場合として、 $\varepsilon_f = 4 \times 10^{-3}$ (高強度), $\varepsilon_f = 2 \times 10^{-3}$ (高剛性)), ℓ_{cf} : 加力点からの貼付け長さ, ℓ_e : 有効付着長 (4.1 参照)

(1) 高強度タイプ

曲げ破壊安全度 (P_{max}/P_{mu}) - 付着長さ余裕度 (ℓ_{cf}/ℓ_D) 関係を図 - 9 に, また, 併せて曲げ破壊安全度 (P_{max}/P_{mu}) - せん断余裕度 (P_{su}/P_{mu}) 関係を図 - 10 に示す。(ただし, ℓ_{cf} : 加力点からの CFRP 板の貼付け長さ, ℓ_D : 必要付着長さ (高強度タイプでは $\ell_D = 4.26 \cdot \ell_e$) を示す。) 図 - 9 より, 加力点からの CFRP 板貼付け長さが必要付着長さより短い場合 ($\ell_{cf}/\ell_D < 1$) においても, $P_{max}/P_{mu} > 1$ となっている。また, 図 - 10 より, せん断余裕度 (P_{su}/P_{mu}) が 1.5 以上であれば, 高強度タイプ補強試験体の曲げ終局耐力計算値 P_{mu} は, 最大耐力実験値 P_{max} に対し, 安全側に評価されることが確認された。

(2) 高剛性タイプ

一方, 高剛性タイプの場合は, 図 - 11 より, 本研究で使用したデータは全て $\ell_{cf}/\ell_D < 1$ であり, CFRP 成型板のひずみが 2000μ に達する前に付着破壊を生じた試験体が多く見られる。また, 図 - 12 より, $P_{max}/P_{mu} < 1$ となった C21D19-H52L, C21D13-H52L-W 試験体は, いずれもせん断余裕度が 1.3 程度で, 破壊形式 S であった。高剛性タイプの場合は補強材の断面剛性が高く, 鉄筋量や e プレート補強量が増加するとせん断ひび割れを起点とした剥離破壊が生じやすくなり, このような結果が生じたと推察される。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) CFRP 成型板断面剛性がより大きく, 貼付け長さのより長いもののほうが, 大きな補強効果 (曲げ剛性および曲げ耐力) が得られた。
- (2) CFRP 成型板の補強量が等しい場合, 試験体の曲げ剛性および最大耐力は, CFRP 断面剛性の大きなもののほうが大きな結果となった。
- (3) CFRP 成型板有効付着長と最大ひずみとの間には相関がみられ, 有効付着長さに対して高強度タイプで 4.26 倍, 高剛性タイプで 2.13 倍の貼付け長さを確保すれば, CFRP 成型板最大ひずみはそれぞれ 4000μ , 2000μ が確保できることが確認された。
- (4) (3) の最大ひずみ算出式を用いた曲げ終局耐力式によって算出された曲げ終局耐力とせん断余裕度との関係により, 最大耐力実験値を安全側に評価することが可能となった。

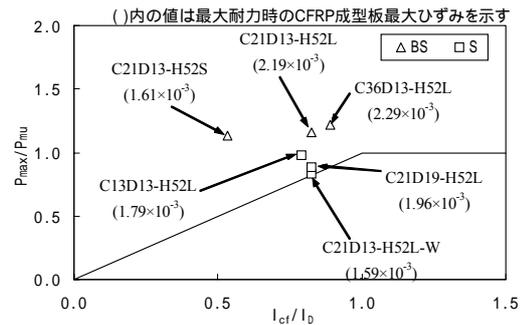


図 - 11 曲げ破壊安全度 - 付着長さ余裕度関係 (高剛性タイプ)

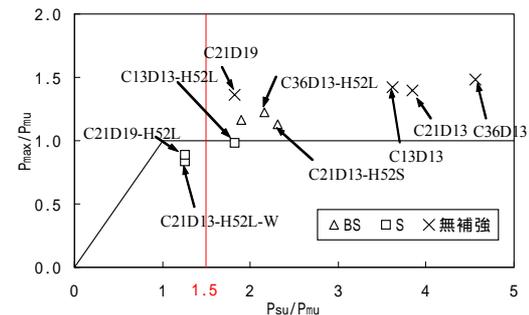


図 - 12 曲げ破壊安全度 - せん断余裕度関係 (高剛性タイプ)

参考文献

- 1) 例えば, 木村耕三, 小島克朗, 平田亮, 土屋好男: CFRP 板による RC 補強部材の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 2) 矢野他: CFRP 板とコンクリートの付着性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.113 ~ 116, 2007.8
- 3) 野口貴文, 友澤史紀, 李翰承, 庄司広和: 鉄筋腐食をモデル化した RC 梁における炭素繊維シート曲げ補強効果, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.1, 1996
- 4) 村上聖, 三井宣之, 武田浩二, 中島祥貴, 高橋啓介, 久部修弘: 低強度コンクリート RC はりに対する炭素繊維シートの曲げ補強効果 (その 2 解析的検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.341 ~ 342, 1996.9
- 5) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 松岡健一: RC 梁における載荷点間隔が FRP シートの曲げ付着性状に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, 1999
- 6) 金久保利之, 古田智基, 福山洋: 等価付着スリットによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式, コンクリート工学論文集, 第 12 巻, 第 3 号, pp.27 ~ 37, 2001.9
- 7) 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 第 3 編 3 章, (社)日本建築学会, 2002