

# 論文 ポリマーセメント系接着剤を用いた CF Strand Sheet 補強 RC 梁の耐震設計法に関する一考察

岸 哲也\*1・鈴木 裕介\*2・Sanjay PAREEK\*3

**要旨：**本研究は、新規開発された連続繊維補強材（以下、CFRP）である CF strand sheet に着目し、ポリマーセメント系接着剤を用いた CF strand sheet 貼付補強 RC 梁部材の曲げ・せん断耐力試験を行い、それらの結果より、現行の耐震設計法との適合性について検討を行った。その結果、ほとんどの試験体において剛性および耐力の上昇を確認できた。耐震設計法の検討においても、ポリマーセメント系接着剤および CF strand sheet を用いて、曲げおよびせん断補強を施した RC 梁は現行の耐震設計法での評価が可能であることを確認した。

**キーワード：**CFRP, CF strand sheet, ポリマーセメント系接着剤, 曲げ, せん断, 耐震設計

## 1. はじめに

筆者らはこれまで、鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐震補強・補修方法の一手法として広く普及している、連続繊維補強材(Continuous Fiber Reinforced Polymer 以下、CFRP)を用いた RC 梁部材への曲げ・せん断補強効果について報告してきた<sup>1)</sup>。また、それと同時期に、日本建築学会より連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案(以下、CFRP 指針)<sup>2)</sup>が初刊され、布状、板状および格子状など様々な形状を有する CFRP の中でも、布状である連続繊維シート(以下、CF sheet)外部貼付補強を施した RC 部材の耐震設計法が、確立されつつある。板状である連続繊維プレート(以下、CF plate)を用いた工法においても、多くの研究論文が報告され、年々、実用化も進んでいる。しかし、上述のような CFRP による耐震補強効果が認められるのと同時に、CFRP が有する断面形状から、施工期間の長期化(CF sheet 構法)および付着強度の確保が困難(CF plate 構法)などの致命的問題点も挙げられている<sup>3)</sup>。さらには、筆者らが環境負荷軽減および防火面の配慮から CFRP 常用接着剤(エポキシ樹脂系)に代わり、接着性では劣るポリマーセメント系接着剤の開発も同時に行っている<sup>4)</sup>ことから、CFRP 付着強度の評価の際は、極めて注意が必要になると考えられる。以上のことから、本研究では、施工期間および付着強度の改善を目的として開発された、連続繊維ストランドシート(以下、CF strand sheet)に着目し、ポリマーセメント系接着剤を用いた CF strand sheet 貼付補強 RC 梁部材の曲げ・せん断耐力試験を行った。本論文は、その実験結果から、CF sheet 補強または CF plate 補強試験体との比較および接着剤の違いによる比較を行い、ポリマーセメント系接着剤を用いた CF strand sheet 補強 RC 造梁部材における耐震設計法に関して検討している。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

**Table 1** に鉄筋、**Table 2** にコンクリートの材料特性をそれぞれ示す。鉄筋は主筋に SD295(D10)、せん断補強筋に SR295(4φ)を使用した。コンクリートの設計基準強度は  $F_c=24\text{N/mm}^2$  とした。**Table 3** に使用した CFRP の材料特性を、**Photo 1** に使用した CF strand sheet の形状を示す。なお、本研究に使用した CF strand sheet は、CF sheet のように接着性が良好であり、CF plate のように多層貼付が不要であるといったそれぞれの長所を合わせ持つ、炭素繊維系材である。接着剤は、ポリマーセメント系接着剤 2 種類(P1, P2)および比較用として常用接着剤であるエポキシ樹脂系接着剤 2 種類(EP, ER)を使用した。

**Table 1 Mechanical properties of steel bars**

Type		Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Yield strain (%)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (N/mm <sup>2</sup> )
SD295	D10	410.7	0.21	575.8	$1.97 \times 10^5$
SR295	4φ	-	-	517.1	-

**Table 2 Properties of concrete**

Type	Slump (cm)	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	Longitudinal strain (%)	Young's modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Shear modulus (N/mm <sup>2</sup> )	Split tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
Normal	19.0	30.3	0.26	$1.23 \times 10^4$	$5.03 \times 10^4$	2.72

**Table 3 Physical properties of CFRP's**

Type of CFRP	Type of fiber	Thickness (mm)	Width (mm)	Fiber mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (N/mm <sup>2</sup> )	
CF Sheet	Carbon	0.17	100	300	3,400	$2.3 \times 10^5$	
CF Plate		1.00	50	600	2,500	$1.5 \times 10^5$	
CF Strand Sheet		600SS	0.35	100	640	3,400	$2.3 \times 10^5$
		800SS	0.44	100	800		



**Photo 1 View of CF strand sheet**

\*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

\*3 日本大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

## 2.2 試験体概要

Table 4 に試験体諸元を示す。Fig.1 (a) 中左に曲げ、(b) 中左にせん断試験体の形状および配筋を示す。曲げ、せん断試験体とも長方形断面  $b \times D = 120 \times 200 \text{mm}$  とし、上下主筋は 2-D10 (引張鉄筋比  $p_t = 0.68$ )、せん断補強筋は RC 梁の最小せん断補強筋比 0.2% を満たすよう  $4\phi - @100$  ( $p_w = 0.21\%$ ) として配筋した。Fig.2 (a) に曲げ、(b) にせん断試験体の CFRP 補強後の形状を示す。曲げ試験体は梁底面に CFRP1 層または 2 層貼付とし、せん断試験体は CF sheet 補強が 2 層巻き付け、CF plate および CF strand sheet 補強が両側面 1 層貼付とした。

## 2.3 荷重および測定方法

Fig.1 (a) 中右に曲げ試験体、Fig.1 (b) 中右にせん断試験体の変位計取付け位置を示す。荷重は、Fig.1 内に示すように試験体をアムスラー型万能試験機に設置し、2 点集中荷重とした。なお、荷重の際、荷重、変位および各ひずみ度を連続的に測定した。

## 3. 曲げ実験結果

### 3.1 最終破壊状況

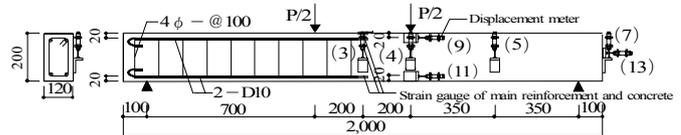
Fig.3 に曲げ試験体の最終破壊状況を示す。Plain は荷重点下側付近に曲げひび割れが集中し、コンクリート上縁が圧壊し、終局に至った。CF sheet 補強試験体は、P1 が荷重点下側付近で部分的に接着および凝集破壊を示し、大きなひび割れがばらついて見られた。P2 および ER は、ほぼ同様の破壊傾向となり、ひび割れが試験体全体に発生した後、貼付端部から梁中央にかけて凝集破壊を示し、終局に至った。CF plate 補強試験体は、接着性が良好であった P1 および EP において、破壊が集中して見られ、ひび割れ本数の減少およびひび割れ幅の拡大が顕著となった。また、P1 が凝集破壊、P2 が接着破壊、EP がせん断破壊を示し、終局に至った。CF strand sheet 補強試験体は、P2 を使用した試験体において接着破壊 (接着破壊に至った試験体に関しては、接着破壊時点でその試験体の終局とする) を示し、荷重点下側付近の曲げひび割れを進行させる結果に至った。EP を使用した試験体は、せん断破壊または凝集破壊を示した。CF strand sheet の貼付補強量 3 パターン (600SS/1L, 800SS/1L および 600SS/2L) で比較すると、P2 を使用した試験体は、600SS/1L, 800SS/1L, 600SS/2L と補強量が増すことに連れて CF strand sheet 剥離が早期となり、ひび割れの範囲が縮小され、応力が梁中央付近に集中した。EP を使用した試験体は、600SS/1L が凝集破壊を示したのに対し、600SS/2L および 800SS/1L は荷重支点間においてコンクリートのせん断破壊に至った。以上より、600SS/2L および 800SS/1L は、本実験の RC 梁の断面に対する補強量が過多であったと考えられる。

## 3.2 荷重 (P) - たわみ ( $\delta$ ) 曲線

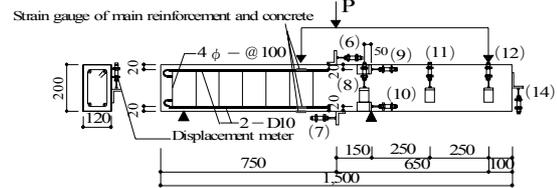
Fig.4 に荷重 (P) - たわみ ( $\delta$ ) 曲線を示す。たわみ ( $\delta$ ) は、梁中央の変位計 (Fig.1 (a) に示す変位計 (3)) の値を用いた。図中の●は引張鉄筋降伏点を示す。CF sheet 補強では、接着剤の違いに関わらず、降伏荷重および最大荷重

Table 4 Identification and constituents of RC beams

Type of specimen	Type of CFRP	No. of layers	Bonding agent	Strength test	
				Flexure	Shear
Plain	—	—	—	○	○
P1-S	CF Sheet	2Layers	Polymer-cement Paste1	○	○
P2-S			Polymer-cement Paste2	○	○
ER-S			Epoxy Resin	○	○
P1-P	CF Plate	1Layer	Polymer-cement Paste1	○	○
P2-P			Polymer-cement Paste2	○	○
EP-P			Epoxy Resin	○	○
P2-600SS/1L	CF Strand Sheet	1Layer	Polymer-cement Paste2	○	—
EP-600SS/1L			Epoxy Putty	○	—
P2-600SS/2L			Polymer-cement Paste2	○	—
EP-600SS/2L	Sheet	2Layers	Epoxy Putty	○	—
P1-800SS/1L			Polymer-cement Paste1	—	○
P2-800SS/1L			Polymer-cement Paste2	○	○
EP-800SS/1L	1Layer	1Layer	Epoxy Putty	○	○



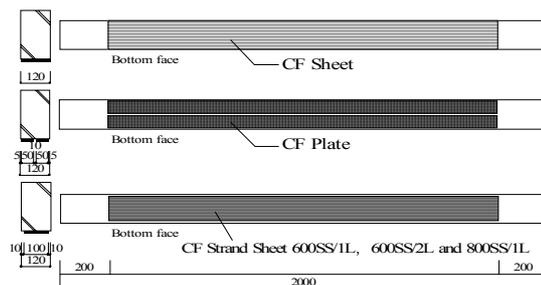
(a) Flexural strength test



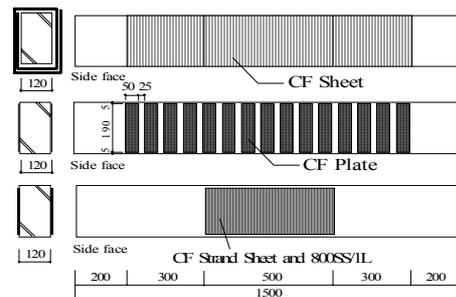
(b) Shear strength test

(Unit : mm)

Fig.1 Details and set-up of RC beams for flexural and shear strength tests.



(a) Flexural strengthening



(b) Shear strengthening

(Unit : mm)

Fig.2 Bonding methods of CFRP's

ともに同等の値を示し、ほぼ同様の曲線に至った。CF plate 補強では、P2 が早期に接着破壊を示したのに対し、P1 および EP はほぼ同等の最大耐力を示したが、接着力で上回る EP は弾性剛性の低下がわずかなものにとどまった。CF strand sheet 補強試験体において、600SS/1L は、P2 を用いた試験体が EP を用いた試験体を降伏荷重で上回り、最大荷重も大きな差は見られなかったが、変位 10mm 程度で CF strand sheet が剥離し、接着破壊に至った。600SS/2L は、EP を用いた試験体が P2 を用いた試験体を初期段階から荷重が上回り、降伏荷重および最大荷重で大きな値を示し、接着剤による差が顕著に表れたが、どちらの試験体も変位 10mm 程度で終局に至った。

800SS/1L も同様に、EP を用いた試験体が降伏荷重および最大荷重で上回った。また、EP を用いた試験体は載荷支点間のせん断ひび割れが大きくなるに連れて、段階を踏むように耐力低下を示した。CF strand sheet 補強量の違いから比較すると、P2 を用いた試験体は、3 体とも 10mm 程度で接着破壊を示したが、最小補強量である 600SS/1L 試験体が降伏荷重後も大きな勾配を示した。EP を用いた試験体は、せん断破壊を示した 600SS/2L および 800SS/1L 試験体の変位 10mm 程度で早期に耐力低下を示した。以上より、Fig.3 に示す破壊状況からうかがえる結果同様、RC 梁断面に対する CF strand sheet 補強量の検討が必要とされる。

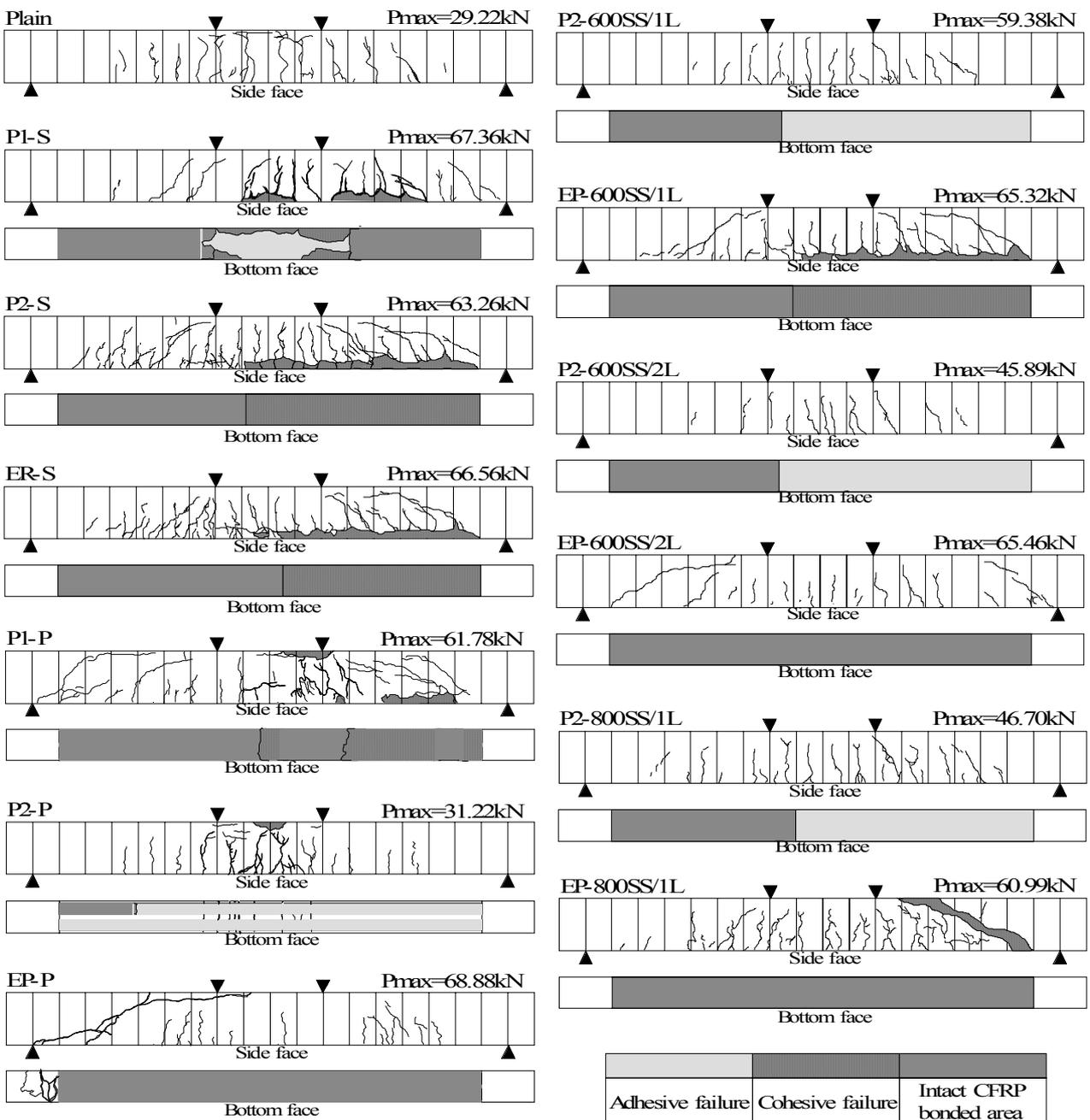


Fig.3 Failure mode of flexural test specimens

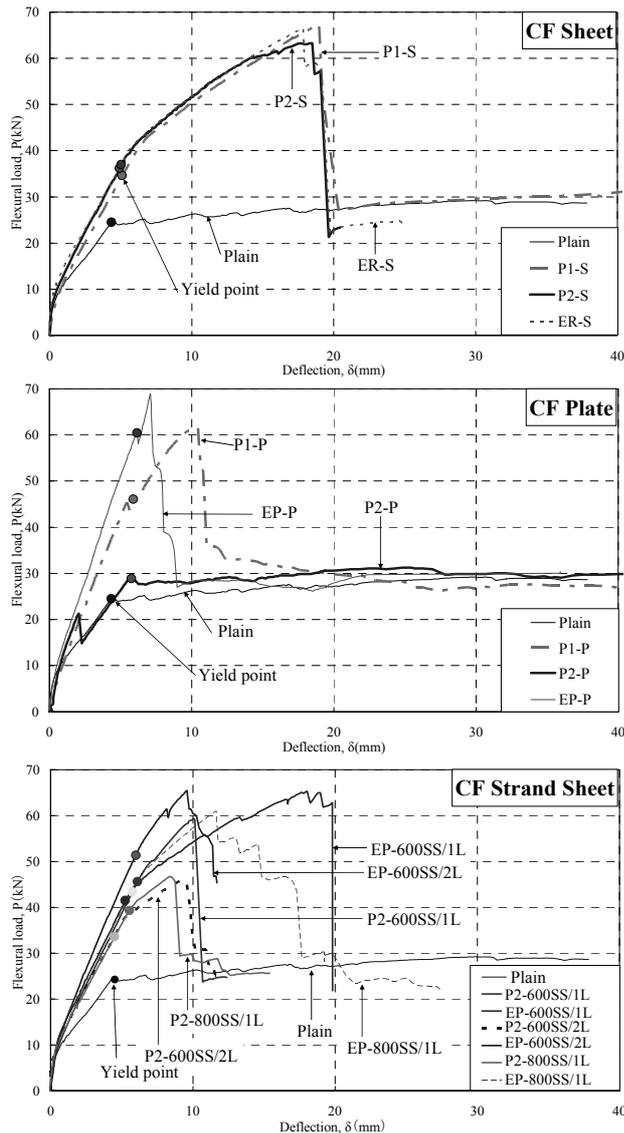


Fig.4 Load (P) - deflection ( $\delta$ ) curves of beams tested for flexural strength

#### 4. せん断試験結果

##### 4.1 最終破壊状況

Fig.5にせん断試験体の最終破壊状況を示す。Plainは、せん断スパン内に細かいひび割れが多数発生し、最終的に、せん断スパン内においてせん断破壊を示し、終局に至った。CF sheet 補強試験体は、補強材を巻きつけるように施工したため、接着剤の違いに関わらず、せん断補強効果からせん断ひび割れが抑制され、曲げひび割れが先行し、せん断スパンの載荷点および支点付近の曲げ圧壊により終局に至った。CF plate 補強試験体もまた、CF sheet 補強試験体同様、せん断ひび割れがほとんど見られず、曲げひび割れが進展した。また、接着剤の違いによる差はほとんど見られなかった。CF strand sheet 補強試験体は、接着剤の違いに関わらず、せん断補強効果から、繊維間に曲げひび割れが先行して発生し、Plain のような大きなせん断変形は示さず、曲げ破壊に至った。

##### 4.2 せん断力 (Q) - 変位 ( $\delta$ ) 曲線

Fig.6 にせん断力 (Q) - 変位 ( $\delta$ ) 曲線を示す。変位たわみ ( $\delta$ ) は、せん断スパン両端の変位計 (Fig.1 (b)) に示す変位計 (8) およびその対称位置となる (5) で測定した変位量の平均の値を用いた。図中の●は引張鉄筋降伏点を示す。CF sheet 補強試験体は、P1~P3において、降伏せん断力は Plain とあまり変わらなかったが、Fig.5 で示したとおり、斜めひび割れがほとんど生じず、繊維間を沿うように曲げひび割れが集中したため、耐力低下が見られなかった。CF plate 補強試験体は、接着剤の違いに関わらず、弾性剛性が改善された。また、せん断補強効果から、曲げ破壊が先行したため耐力低下は見られなかった。CF strand sheet 補強試験体は、降伏までの剛性にばらつき

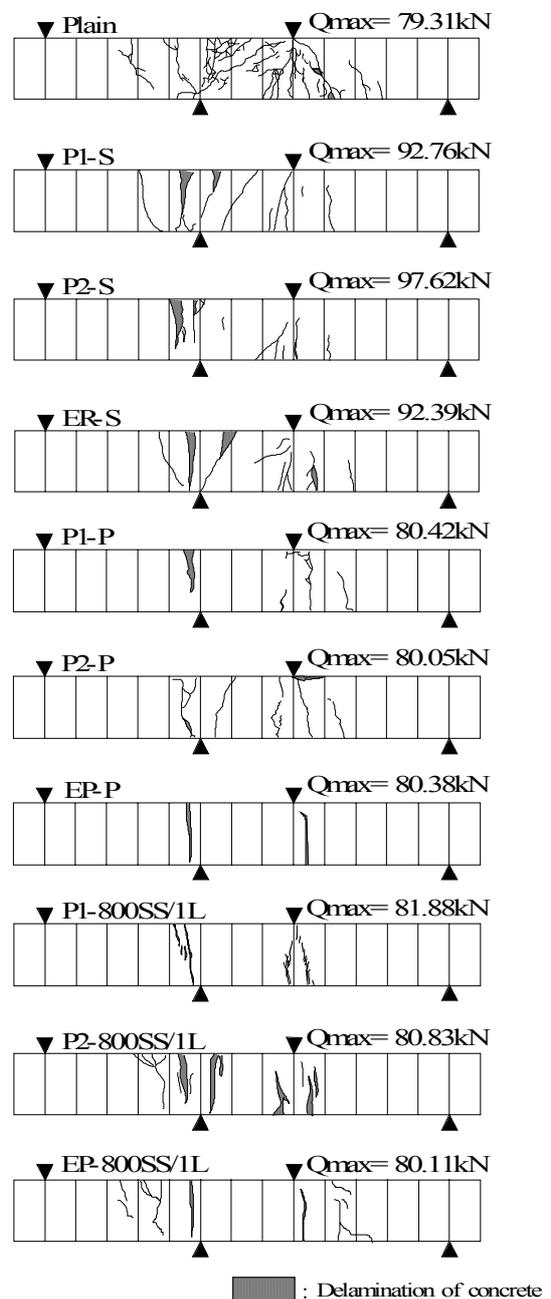


Fig.5 Failure mode of shear test specimens

が見られたが、平均的に Plain を上回る傾きを示した。また、CF strand sheet 補強試験体もまた、せん断補強効果から、曲げ破壊が先行し、大きなせん断破壊が見られなかったため、Plain のような急激な耐力低下は見られなかった。

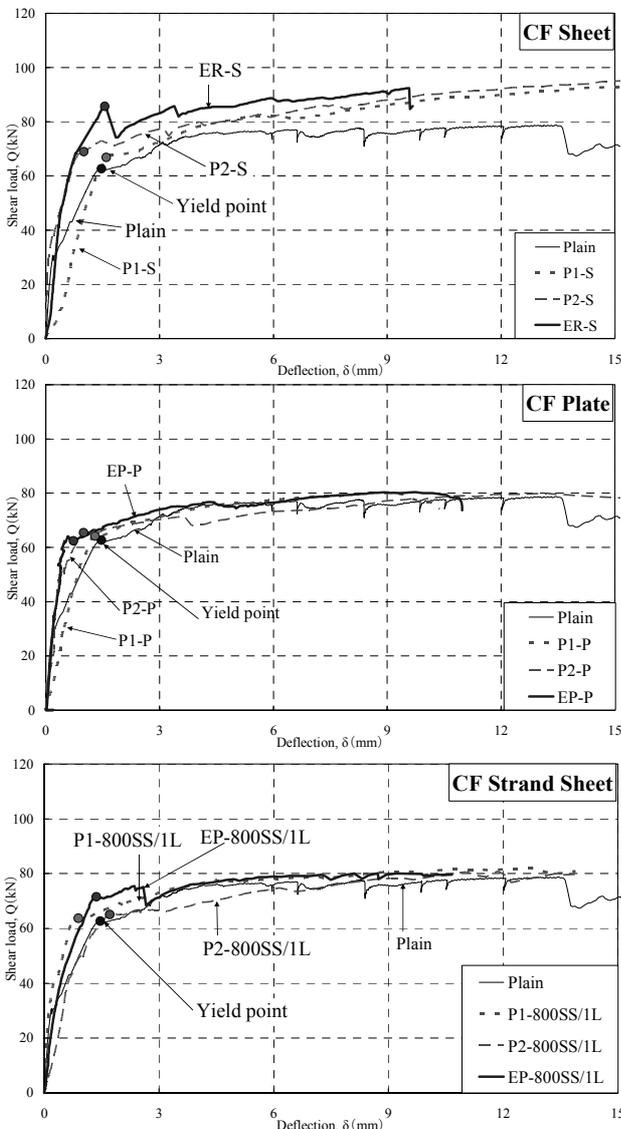


Fig.6 Shear load (Q) - deflection (δ) curves of beams tested for shear strength

## 5. CFRP 補強効果の評価

### 5.1 曲げ補強効果

Table 5 中左に各試験体の曲げ終局強度一覧を荷重値で示し、Fig.7 に付着強度の実験値と計算値の比較を示す。終局強度の実験値は、各試験体の最大荷重値とし、計算値は、CFRP 完全接着を想定し、平面保持仮定の下、算出した<sup>2)</sup>。付着強度の実験値において、接着破壊に至らなかったものは、終局強度をその試験体の付着強度とした。付着強度の計算値は、式(1)または式(2)より、本試験体が該当する式を選定し、算出した値とした。なお、

計算値算出の際、接着剤によるパラメータは加味していない。終局強度では、早期に接着破壊を示した P2-P および P2-600SS/2L, P2-800SS/1L 以外は、実験値が計算値を上回る、または、均衡した値となり、安全側に評価された。付着強度では、CF sheet 補強のすべて、CF strand sheet 補強の 600SS/1L および EP-800SS/1L の計 6 体は、実験値と計算値が均衡した値を示した。それ以外は、実験値が計算値を大きく下回ったが、実験結果での破壊モードのほとんどがコンクリートのせん断破壊または凝集破壊に至ったため、明確な付着強度が得られなかったと推察できる。以上より、梁断面またはコンクリート強度、CFRP の補強量等を考慮することで、付着強度の上昇が見込めるため、再度検討が必要である。また、P2-P は、接着破壊を示し、かつ計算値を大きく下回ったため、CF plate 定着力の改善が必要である。

$$l_e = 0.7 \sqrt{\frac{t_f \cdot E_{fd}}{\sigma_B}} \quad (1)$$

$$l_b \geq l_e \text{ のとき, } P_b = 1.1 \cdot \sigma_B^{0.2} \cdot b_f \cdot l_e \quad (1)$$

$$l_b < l_e \text{ のとき, } P_b = k_f \cdot \sigma_B^{0.2} \cdot b_f \cdot l_b \quad (2)$$

$$k_f = 0.7 \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_e} \pi\right) + 1.8$$

ここに、 $l_e$ : CFRP の有効付着長 (mm),  $t_f$ : CFRP の有効設計厚さ (mm),  $E_{fd}$ : CFRP の規格ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $l_b$ : CFRP の付着長 (mm),  $b_f$ : CFRP の幅 (mm),  $k_f$ : 付着長による強度の補正係数

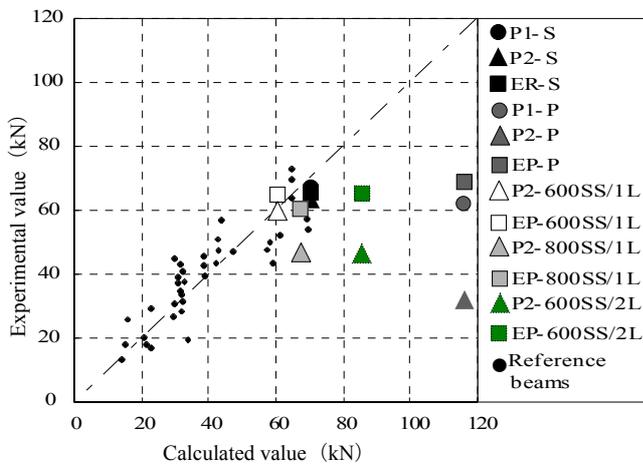
### 5.2 せん断補強効果

Table 5 中右に各試験体のせん断終局強度一覧をせん断力値で示し、Fig.8 に各試験体の終局塑性率 ( $\mu$ ) - せん断余裕度 ( $Q_{su}/Q_{mu}$ ) 関係を示す。終局強度の実験値は、各試験体の最大荷重値とし、計算値は、CFRP の補強効果を累加したせん断終局強度と CFRP の付着割裂強度のうちの最小値を採用した<sup>2)</sup>。なお、計算値算出の際、接着剤によるパラメータは加味していない。終局塑性率は、荷重-変形曲線において最大耐力の 80% になる時の変形角を曲げ降伏時の変形角で除した値とした<sup>2)</sup>。せん断余裕度は、Table 5 で示した各試験体のせん断終局強度の計算値 ( $Q_{su}$ ) を、曲げ終局強度の計算値 ( $Q_{mu}$ ) で除した値とした<sup>2)</sup>。終局強度においては、CFRP および接着剤の違いに関わらず、すべての試験体で実験値が計算値を上回り、良好な対応が見られた。 $\mu$ - $Q_{su}/Q_{mu}$  関係より、各せん断余裕度が CF sheet 補強で 1.18, CF plate 補強で 1.22 および CF strand sheet 補強で 1.14 であることから、CFRP の違いによるせん断補強効率に大差は見られないことが確認できる。また、それぞれの試験体が有するせん断余裕度での終局塑性率を検討すると、全てにおいて下限値 (Fig.8 中の一点鎖線) を上回り、安全側に評価された。

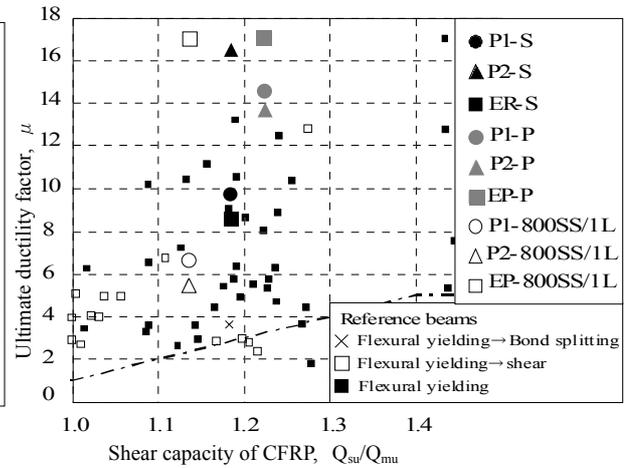
**Table 5 Results of RC beams tested for flexural and shear strengthening using CFRP**

Type of specimen	Flexural strength			Failure mode (CFRP/RC beam)	Shear strength			Failure mode (CFRP/RC beam)
	Ultimate strength		Exp./Cal.		Ultimate strength		Exp./Cal.	
	Experimental (kN)	Calculated (kN)			Experimental (kN)	Calculated (kN)		
Plain	29.22[1.00]	19.53[1.00]	1.50	—/Flexural	73.91[1.00]	63.20[1.00]	1.17	—/Shear
P1-S	67.36[2.31]		1.19	CF Sheet fracture/Flexural	92.76[1.26]		1.24	Intact CFRP bonded area/Flexural
P2-S	63.26[2.17]	56.83[2.91]	1.11	Cohesive/Shear	97.62[1.32]	74.79[1.18]	1.30	
ER-S	66.56[2.28]		1.17	Cohesive/Shear	92.39[1.25]		1.24	Bond-Splitting/Flexural
P1-P	61.78[2.11]		0.95	Cohesive/Shear	80.42[1.09]		1.04	
P2-P	31.22[1.07]	64.72[3.31]	0.48	Adhesive/Flexural	80.05[1.08]	77.34[1.22]	1.04	Bond-Splitting/Flexural
EP-P	68.88[2.36]		1.06	Adhesive/Shear	80.38[1.09]		1.04	
P2-600SS/1L	59.38[2.03]	56.34[2.88]	1.05	Adhesive/Flexural	—	—	—	—
EP-600SS/1L	65.32[2.24]		1.16	Cohesive/Flexural	—	—	—	
P2-600SS/2L	45.89[1.57]	59.80[3.06]	0.77	Adhesive/Flexural	—	—	—	—
EP-600SS/2L	65.46[2.24]		1.09	Cohesive/Shear	—	—	—	
P1-800SS/1L	—	—	—	—	81.88[1.11]		1.14	Bond-Splitting/Flexural
P2-800SS/1L	46.70[1.60]	57.27[2.93]	0.82	Adhesive/Flexural	80.83[1.09]	71.75[1.14]	1.14	
EP-800SS/1L	60.99[2.09]		1.06	Cohesive/Shear	80.11[1.08]		1.12	

Note, [ ]: Ratio to Plain



**Fig.7 Experimental vs. calculated bond strength of CFRP in flexure**



**Fig.8 Ultimate shear ductility factor of RC beams strengthened by CFRP**

6. まとめ

- (1) 曲げ試験結果より、RC 梁の CF strand sheet による曲げ補強は、梁断面およびコンクリート強度と CF strand sheet 補強量を正確に把握し、付着強度を評価する必要があると考えられる。
- (2) せん断試験結果より、RC 梁の CF strand sheet によるせん断補強は、接着剤の違いに関わらず、実用化されている CFRP (CF sheet および CF plate) によるせん断補強効果と同等の結果が得られた。
- (3) ポリマーセメント系接着剤および CF strand sheet を用い、曲げ・せん断補強した RC 梁は、現行の補強効果の評価においても評価が可能であるとともに、その有効性が確認できた。

謝辞

本研究は、2009 年度 日本大学工学部研究費による助成を受けた成果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) S.Pareek and K.Kuroda : Shear strengthening of RC beams by continuous fiber reinforcing materials using polymer cement pastes and mortars as bonding agents, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 4<sup>th</sup> International Conference, Calgary, Alberta, Canada, pp.1-8, July 2004
- 2) 日本建築学会:連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 2002
- 3) S.Pareek, Y.Suzuki and A.Kobayashi: Flexural and shear strengthening of RC beams using newly developed CFRP and polymer-cement pastes as bonding agents, 8<sup>th</sup> International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-8, University of Patras, Patras, Greece, pp.1-10, July 2007
- 4) Sanjay Pareek, 倉田光春, 外山隆吉: RC 梁の連続繊維シートによる曲げ補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No.3, pp.1477-1482, 1999