

論文 炭素繊維成形板により耐震補強されたRC柱の力学性状

藤村雅彦^{*1}・東端泰夫^{*2}・毛井崇博^{*3}・宮内靖昌^{*1}

要旨:阪神・淡路大震災を契機として、既存建物の耐震補強工事が全国規模で実施されている。耐震補強に採用される工法は、補強後の耐震性能はもとより施工条件（無騒音・無粉塵・無臭・無廃材）を満足するものが数多く用いられる傾向にある。鉄筋コンクリート柱のせん断補強を対象に、上記の施工条件を満足する炭素繊維成形板を用いた場合の耐力・変形性能に関する補強効果を実験により確認した。

キーワード:鉄筋コンクリート柱、炭素繊維成形板、補強、耐力、変形性能、継手部

1. はじめに

既存柱のせん断破壊を防止し韌性を向上させる補強法には、従来から用いられている「鋼板巻き工法」、最近多用されている「炭素繊維シート巻き工法」等がある。特に、「炭素繊維シート巻き工法」は、その補強効果に関する研究が近年数多く行われており、耐力・変形性能の評価方法についても明確にされてきている。

今回、鉄筋コンクリート柱を対象に、実験シリーズⅠでは「炭素繊維成形板工法」の補強効果について、「炭素繊維シート巻き工法」と比較検討を行い、実験シリーズⅡでは「炭素繊維成形板工法」における後貼り炭素繊維シートの定着法の検討を行った。

行い、炭素繊維シートを用いた「炭素繊維成形板工法」の耐力・変形性能に関する補強効果を確認した。「炭素繊維成形板工法」とは、あらかじめ成形化された炭素繊維シートで既存柱を囲み、既存躯体との隙間に無収縮モルタルを充填した後、成形板の合わせ部に炭素繊維シートを後貼りする工法である。図1に「炭素繊維成形板工法」により補強された柱の断面図を示す。

2. 実験シリーズⅠ

2.1 試験体の設定

試験体は約1/2モデルとした計5体からなる。図2に試験体の断面・形状を、表1にそれらの設

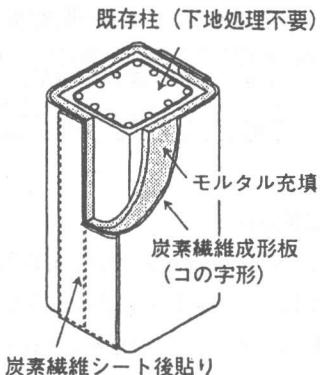


図1 補強後柱断面

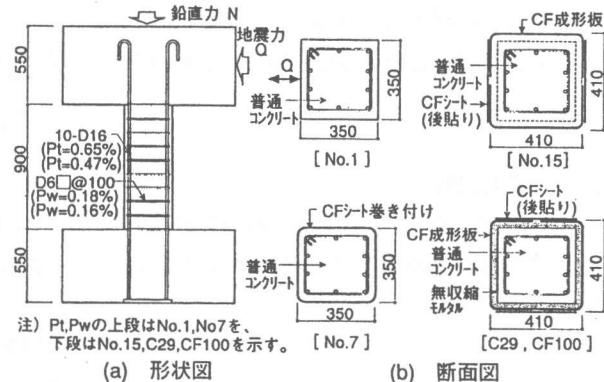


図2 試験体の断面・形状

*1 竹中工務店技術研究所生産研究開発部研究員 (正会員)

*2 竹中工務店技術研究所生産研究開発部主席研究員 工博 (正会員)

*3 竹中工務店技術研究所生産研究開発部主任研究員 (正会員)

表1 試験体一覧

試験体		柱断面	補強法	充填材料	成形板定着位置	n_0
No.1	基準	350×350	無補強	-	-	0.3
No.7	補強	350×350	炭素繊維シート巻き工法	-	-	
No.15		410×410	炭素繊維成形板工法	軸体コンクリート	加力面	
C29				無収縮高強度モルタル	加力面外	
CF100				無収縮低強度モルタル	加力面外	

 n_0 : 軸力比 ($N/bDFc,b \times D = 35 \times 35$)

定条件を示す。試験体は、柱内法長さ 90cm、柱断面 35cm × 35cm を基準断面寸法とした。No.1 試験体は、せん断破壊する既存柱を想定した基準試験体である。他の 4 体は No.1 試験体を補強した試験体で、No.7 試験体は「炭素繊維シート巻き工法」試験体、他の 3 体は「炭素繊維成形板工法」試験体である。なお、補強試験体には、同量（2 層）の炭素繊維シート補強を行ない補強効果の比較検討を行なうこととした。

「炭素繊維成形板工法」試験体では、図 2 に示すように成形板の定着部を加力面（フランジ面）と加力面外（ウェブ面）に設け、加力方向に対する成形板定着面の影響を検討した。さらに、表 1 に示すように充填材料をパラメーターとし、特に CF100 試験体は無収縮モルタルを低強度にすることにより、低強度の仕上モルタルを残存させた柱の補強を想定した。なお、実際の施工では仕上モルタル残存による補強では仕上げモルタルと成形板の隙間に高強度無収縮モルタルが充填されることとなるが、実験では低強度無収縮モルタルのみとした。

2.2 使用材料

表 2~4 に試験体に用いた材料の強度試験結果を示す。鉄筋は全試験体共通で主筋 D16(SD345)、帯筋(SD295)とした。

2.3 加力方法

加力方法には、柱高さ中央に反曲点がくる建研式加力装置を用い、一定軸力 ($N/bDFc=0.3, b \times D=350 \times 350$) を導入後に正負繰り返し対称曲げせん断力を載荷した。

加力サイクルは、柱脚に対する柱頭の水平変位 δ を柱内法長さで除した柱の変形部材角 R による変形制御により行なった。

表2 コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	試験体
普通コンクリート	25.1	2.28	23100	No.1,7
普通コンクリート	28.7	2.17	23100	No.15
普通コンクリート	24.1	2.47	21500	C29
普通コンクリート	21.9	1.63	19700	CF100
無収縮モルタル	55.1	4.05	21900	No.15
無収縮モルタル	12.7	-	10500	C29

表3 鉄筋の機械的性質

鉄筋径 (使用箇所)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	試験体
	373	574	190000	
D16 (主筋)	453	676	188000	C29
	375	566	191000	CF100
	302	523	194000	No.1,7,15
D6 (帶筋)	329	526	172000	C29
	411	560	192000	CF100

表4 炭素繊維シートの機械的性質

単位幅あたり 断面積 (cm/m ²)	単位幅あたり 重量 (g/m ²)	引張 基準強度 (N/mm ²)	設計用 基準強度 (N/mm ²)	設計用 弾性率 (N/mm ²)
1.67	300	3,433	1,618	235,000

2.4 実験結果

図 3~7 に各試験体の荷重一部材角関係を示す。No.1 試験体は、曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れの発生後、コンクリートの圧壊が確認された時点で最大耐力に達せん断破壊に至った。以後、部材角の増大とともに急激な耐力低下を生じた。

他の試験体は、軸体面に炭素繊維シートが巻かれているためコンクリート部材としての破壊性状の確認が困難であったが、最大耐力以降、シートの

剥離音発生、コンクリートの膨張に伴うシートのはらみ出し、シート繊維方向亀裂等の破壊性状を示したことから、部材角の増大とともに内部コンクリートのせん断ひび割れが進展したものと考えられる。鉄筋のひずみ状況をみると、No.1, 7 試験体では、帶筋が降伏ひずみに達していたものに対し、主筋は降伏ひずみに達していない状況であった。

「炭素繊維成形板工法」試験体では、主筋が降伏ひずみ近傍に達しており、帶筋は完全に降伏ひずみに達している状況であった。

炭素繊維成形板により補強された 3 体の試験体は、成形板定着部での破断は確認されず、CF100 試験体以外は最終的にはコーナー部のシートが破断し終局を迎えた。

2.5 実験値と計算値の比較検討

表 5 に各試験体の耐力・変形性能の実験値と計算値を示す。なお、耐力算定は既報¹⁾の算定式を参照し(1), (2)式によった。なお、炭素繊維シートの設計用材料強度は、 $\sigma_{cf}=1618(N/mm^2)$ とした。

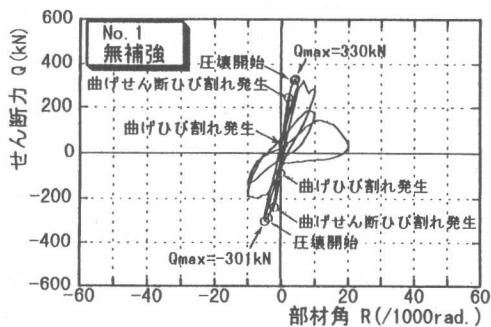


図 3 セン断力-部材角関係 (No.1 試験体)

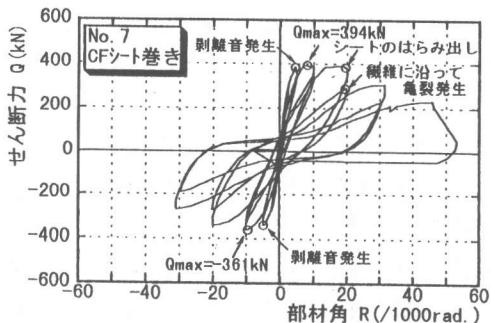


図 4 セン断力-部材角関係 (No.7 試験体)

耐力について、No.1 試験体と比較($Q_{max}/Q_{max,1}$)すると、「炭素繊維シート巻き工法」により補強された No.7 試験体で 1.19 倍の上昇が見られているのに対し、「炭素繊維成形板工法」試験体では 1.27~1.77 倍の上昇が見られた。これは、炭素繊維シートのせん断補強効果と柱の断面増大による効果と考えられる。さらに、実験で得られた最大耐力と耐力計算値の比較(Q_{max}/Q_{cal})は 0.99~1.25 と比較的良い対応を示した。しかしながら、No.15, C29 試験体は最大耐力時には主筋が降伏ひ

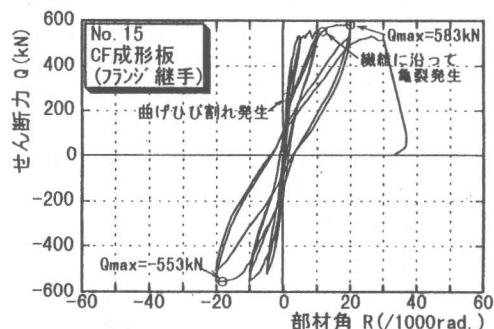


図 5 セン断力-部材角関係 (No.15 試験体)

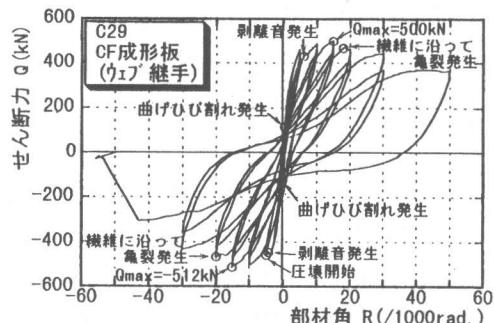


図 6 セン断力-部材角関係 (C29 試験体)

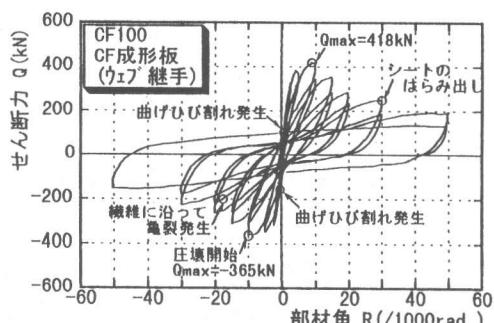


図 7 セン断力-部材角関係 (CF100 試験体)

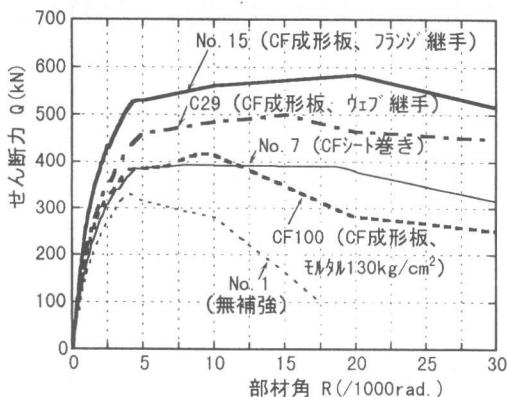
表5 実験値と計算値の比較

	実験値				計算値			Q_{\max}/Q_{cal}
	Q_{\max}	$Q_{\max}/Q_{\max,1}$	R_u	μ_{exp}	Q_{μ}	Q_{su}	破壊モード	
No.1	330	-	10.0	1.50	427	297	せん断	1.11
No.7	394	1.19	30.0	4.50	427	358	せん断	1.10
No.15	583	1.77	30.0	4.50	544	468	せん断	1.25
C29	500	1.52	30.0	4.50	579	452	せん断	1.11
CF100	418	1.27	15.0	2.25	438	421	せん断	0.99

 Q_{\max} :最大荷重(kN) Q_{μ} :曲げ耐力(kN) Q_{su} :せん断耐力(kN) R_u :最大荷重の8割に荷重低下した時点の部材角($\times 1000\text{rad.}$) Q_{cal} :min (Q_{μ} , Q_{su}) μ_{exp} :降伏部材角を $R_y=1/150(\text{rad.})$ とした場合の部材塑性率($=R_u/R_y$)

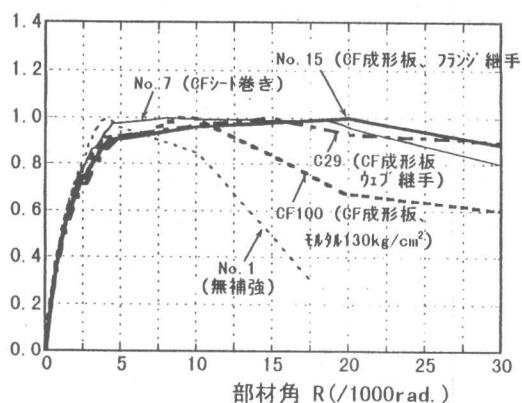
$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 \cdot P_t^{0.23} (F_{ce} + 180)}{M/Q_d + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_y^*} + 0.1 \cdot \frac{N}{b \cdot D} \right\} \cdot b \cdot j \quad (1) \quad M_u = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D \cdot \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c} \right) \cdot b \cdot j \quad (2)$$

$P_w \cdot \sigma_y^* = P_w \cdot \sigma_{wy} + P_{cf} \cdot \sigma_{cf}$

 F_{ce} :充填モルタルを考慮したコンクリート圧縮強度

(せん断力ー部材角関係)

図8 各試験体の包絡線



(せん断力／最大耐力ー部材角関係)

図9 各試験体の包絡線

ずみに達していたことから、(1)式はせん断耐力をかなり安全側に評価している可能性がある。なお、図8にせん断力ー部材角関係の包絡線比較を示す。

変形性能は、降伏部材角を $R_y=1/150(\text{rad.})$ 、終局部材角 R_u を荷重が最大荷重の8割に低下した時点の部材角と定め、終局塑性率 $\mu_{\text{exp}}=R_u/R_y$ によって検討を行なう。No.1 試験体では終局塑性率が $\mu_{\text{exp}}=1.5$ となったのに対し、「炭素繊維シート巻き工法」により補強された No.7 試験体では終局塑性率 $\mu_{\text{exp}}=4.5$ となり変形性能の向上が得られている。「炭素繊維成形板工法」試験体では、No.15,C29 試験体で終局塑性率 $\mu_{\text{exp}}=4.5$ となり、No.7 試験体と同等の変形性能の向上が得られている。したがって、No.15,C29 試験体については、No.7 試験体と同等の変形性能の改善が得られ

たこととなる。低強度の仕上げモルタルを残存させた柱の補強を想定した CF100 試験体については、終局塑性率 $\mu_{\text{exp}}=2.25$ となった。これは、充填モルタルが低強度であったこと、表2に示すように充填モルタルのヤング係数が軸体コンクリートの5割以下であったことが要因となり、部材角の増大に伴ない炭素繊維シートの拘束効果を低下させ十分な変形性能の向上が得られなかつたと考えられる。しかしながら、今回用いた充填モルタルについても変形性能の改善は見られることから、仕上げモルタルの強度と剛性が軸体コンクリートと同等であれば、十分な変形性能の改善が期待でき、耐力の上昇も得られると考えられる。なお、図9にせん断力を最大耐力で無次元化したせん断力／最大耐力ー部材角関係の包絡線比較を示す。

3. 実験シリーズII

3.1 試験体の設定

「炭素繊維成形板工法」では、コ型あるいはL字型の成形板を図1に示すように継手部において後貼り炭素繊維シートによって一体化する。したがって、炭素繊維シートにせん断補強筋と同様の補強効果を期待する場合、継手部の引張強度が母材の引張強度と同等の強度を有する必要がある。

そこで、図10に示すような定着部をモデル化した試験体の引張試験を行ない、後貼り炭素繊維シートの継手方法の検討を行なった。試験体モデルは計11体である。試験体のパラメーターには、後貼り炭素繊維シートの定着長(15~30cm)、鋼製プレートのプレート長(0~90cm)、および継手方法を設定した。なお、鋼製プレートは施工上仮設材として用いられるとともに、継手部における後貼り炭素繊維シートと成形板の偏心を抑える効果を期待している。継手方法については、後貼り炭素繊維シートの定着長を2層とも同じにした試験体と、図10に示すD2515M,D1525M試験体のように、層により定着長を変えた試験体を設定した。

3.2 実験結果

表6に実験結果を示す。なお、同表に示す各試験体の破断時引張応力度は3体の試験体平均値である。

D00-C試験体が継手部を設けない母材のみの基準試験体である。D00-C試験体と同等の引張強度が得られた試験体は、層により定着長を変えたD2515M,D1525M試験体とD30-S試験体の3体であった。

また、実験における後貼り炭素繊維シートと成形板のひずみ分布を測定した。図11にひずみゲージ測定位置、図12,13には2段階の応力レベルにおける成形板(plate)と後貼り炭素繊維シート(cover)のひずみ分布を示す。後貼り炭素繊維シートの定着長を2層とも同じにした試験体では、図12と同様に定着始端部で応力集中が発生していた。層により定着長を変えた試験体では、図13と同様に応力集中が各層の定着始端部で発生した。

図10 試験体一覧

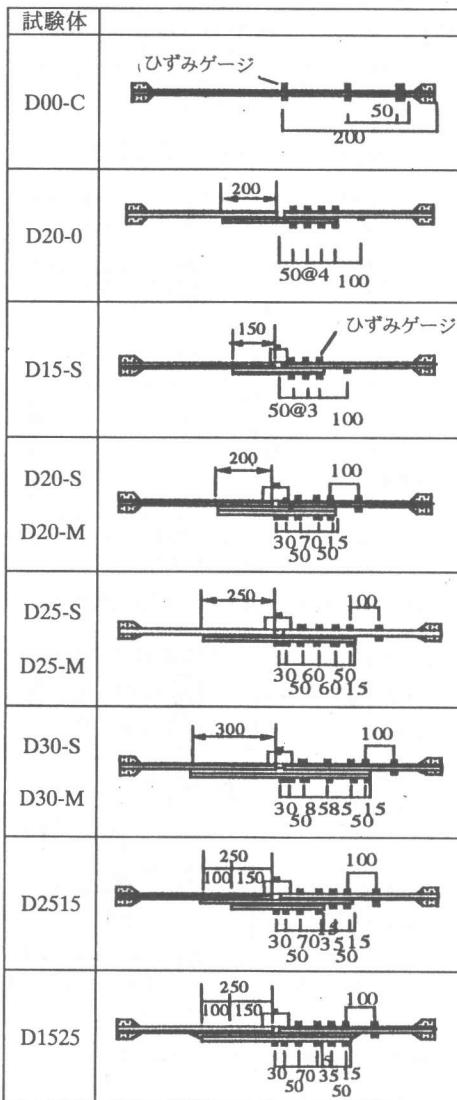


表6 実験結果一覧

試験体	定着長 (mm)	シート 段数	鋼製プレート 長さ (mm)	破断時 引張応力度 (MPa)
D00-C	-	-	-	3339
D20-0	200		0	1649
D15-S	150			2114
D20-S	200	2	60	2382
D25-S	250			1842
D30-S	300			3163
D20-M	200			2192
D25-M	250		90	1755
D30-M	300			1767
D2515M	250,150	2	90	3056
D1525M	150,250	2	90	3014

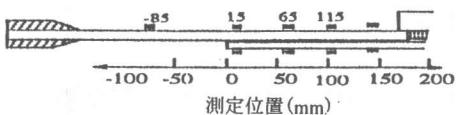


図1 1 ひずみ分布測定位置

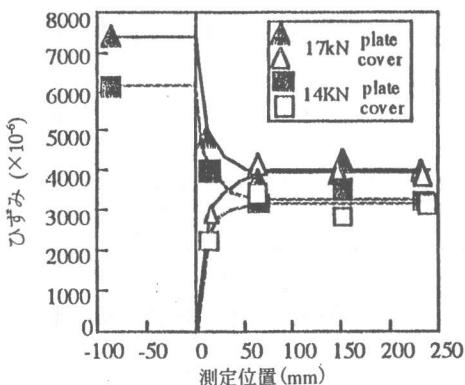


図1 2 ひずみ分布図 (D25S 試験体)

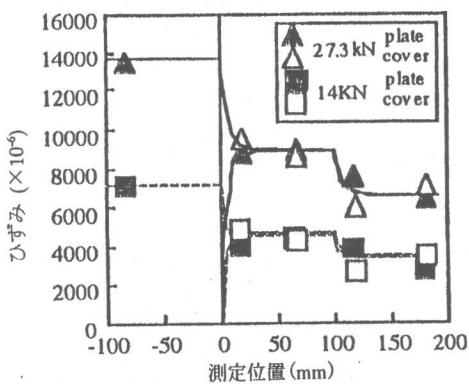


図1 3 ひずみ分布図 (D1525 試験体)

これらの実験結果から、後貼り炭素繊維シートの定着長を2層とも同じにするより、層により定着長を変え後貼り炭素繊維シートに段差を設ける定着方法の方が、定着始端部の応力集中を緩和することができ、母材と同等の引張強度が得られることが解った。

なお、施工上必要となる鋼製プレートのプレート長が継手部の耐力に及ぼす影響はみられなかつた。

4. 結論

「炭素繊維成形板工法」により補強された鉄筋

コンクリート柱の実験結果より得られた結論を以下に示す。

- 1) 「炭素繊維成形板工法」は「炭素繊維シート巻き工法」と耐力および変形性能に関して、同等の補強効果を有している。
- 2) 低強度の仕上げモルタルを残存させた補強において変形性能の向上が得られた。
- 3) 後貼り炭素繊維シートについて層により定着長を変え段差を設けた定着法は、定着始端部での応力集中を緩和し、母材と同等の耐力が得られる。
- 4) 成形板の定着に施工上必要となる仮設の鋼製プレートは継手部の耐力に影響しない。

(謝辞)

本研究の炭素繊維を用いた試験体の計画・製にあたり、三菱化学（株）の御協力を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩橋、毛井、宮内、太田；鉄筋コンクリート柱の補修・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.18, No2, pp1499-1504, 1996