

既存鉄筋コンクリート造柱の炭素繊維シート補強に関する実験研究

白都 滋* 小澤 潤治* 青木 雅秀**

要約： 既存鉄筋コンクリート造建物では、柱に袖壁やサッシ等が取り付く場合が多く、耐震補強工法のひとつである炭素繊維シートを柱断面に対して閉鎖型に巻き付けることができない場合がある。また、雑壁が取り付く場合には、雑壁等に貫通孔を設け、炭素繊維シートを閉鎖型とする補強方法が提案されている。本研究では、雑壁に貫通孔を設けることなく柱部分のみを補強対象とし、通しボルトと定着プレートを用いて炭素繊維シートを擬似的に閉鎖型とした場合の補強効果を確認するための耐震性能確認実験を行った。その結果、本補強方法を用いることにより、曲げ降伏後のせん断破壊性状を示す既存柱の破壊モードを曲げ型の破壊モードとすることができ、変形性能を高める効果が確認された。また、提案した定着プレートの設計法の妥当性を確認するとともに、本補強方法を用いた場合の限界変形角の算定方法を示し、実験結果を安全側に評価できることを示した。

キーワード： 鉄筋コンクリート、柱、耐震補強、炭素繊維シート、変形性能、耐震性能確認実験

目次： 1. はじめに
2. 実験概要

3. 実験結果と考察
4. まとめ

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート（以下RC）造柱のせん断強度、変形性能を高めるために、炭素繊維シート（以下CFシート）を柱断面に対して閉鎖型とする補強工法があり、その性能評価法が確立されている^{1), 2)}。一方、補強対象建物の柱には袖壁等の雑壁やシャッター、サッシが取り付く場合が多く、CFシートを閉鎖型にできない場合が多い。また、雑壁が取り付く場合には、雑壁に貫通孔を設け、炭素繊維シート閉鎖型とする補強方法が提案されているが、復旧工事等では工期に問題がある。本研究では、柱部分のみを補強対象とし、通しボルトと定着プレートを用いてCFシートを擬似的に閉鎖型とした場合の耐震性能を実験で調べ、補強効果を検証した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体を図1に、試験体一覧を表1に示す。試験体は旧基準による既存RC造柱の3/8縮尺モデルとし、5体製作した。柱断面 $b \times D = 30 \times 30\text{cm}$ 、柱内のり高さ $h_0 = 90\text{cm}$ 、主筋は12-D13 ($p_g = 1.69\%$)、せん断補強筋は2-D6@160 ($p_v = 0.13\%$)とし、全試験体共通とした。また、コンクリートの目標圧縮強度は 21N/mm^2 とし、軸力比 $N/(bD\sigma_p)$ (N : 軸力、 σ_p : 材料試験結果によるコンクリートの圧縮強度)はNO.4で1/3、その他の試験体で1/6とした。

NO.1は無補強試験体とし、NO.2～NO.5はCFシート補強試験体である。CFシートによる補強は、断面隅角部の面取り（半径30mm）および表面処理を施し、CFシートをコの字に貼付けた後、貫通孔に設置した通しボルト（ネ

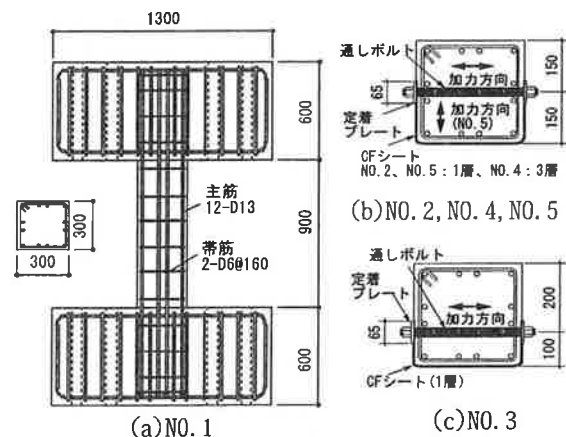


図1 試験体図

表1 試験一覧

試験体名	補強概要	CFシートの層数	柱断面に対する補強断面積	加力方向
NO.1	無補強	-	-	-
NO.2	CFシート+通しボルト補強	1	1/2	補強方向
NO.3		1	1/3	
NO.4		3	1/2	
NO.5		1	1/2	補強垂直方向

ジ鉄筋D16@125)、および定着プレート（厚さ6mm、幅65mm）により擬似的に閉鎖型とした。通しボルトと貫通孔の間にはグラウトを圧入し、定着プレートはエポキシ樹脂系接着剤でCFシートに貼付け接着した。定着プレートの幅は、定着プレートとCFシートの付着強度 $\tau_p = 5\text{N/mm}^2$ として決定した³⁾。

柱断面に対する補強断面（CFシートと通しボルトで囲まれた断面）はNO.3で1/3、その他の試験体で1/2とし

表1 材料試験結果
(a)コンクリート

試験体	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	割裂強度 (MPa)
NO.1	28.4	20.5	0.151	2.57
NO.2	30.1	21.6	0.148	2.79
NO.3	29.8	21.5	0.164	2.81
NO.4	30.8	21.4	0.146	2.89
NO.5	30.5	21.2	0.165	2.69

(b)補強材

補強材の種類 (材質)	降伏点 (MPa)	破断強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	破断伸び (%)
D13(SD345)	383	541	189	18.1
D8(SD295A)	329 ¹⁾	491	183	17.6
D16(SD390)	469	680	195	16.6
PL-6(SS400)	303	453	215	37.8
CFシート1層	-	4580	241	-
3層	-	4120	232	-

10.2%オフセット耐力

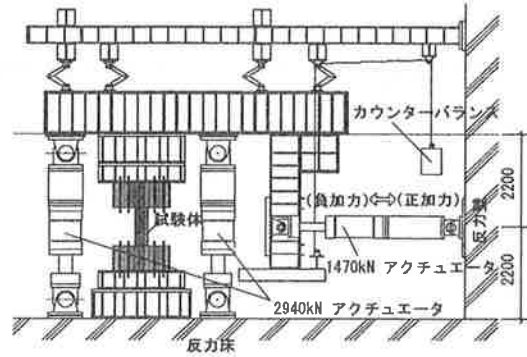


図2 加力装置図

た。また、NO.5は加力直交方向に補強した。CFシートの層数はNO.4で3層、その他の試験体で1層とした。

2.2 使用材料

使用した材料の試験結果を表1に示す。主筋およびせん断補強筋はSD345, SD295A, 通しボルトはSD390とした。定着プレートはSS400, CFシートは目付量300g/m² (設計厚さ0.167mm)を使用した。また、コンクリートの粗骨材の最大寸法は13mmとした。

2.3 加力方法

加力装置の概要図を図2に示す。試験体を反力床、加力梁に緊結し、軸力用フレームに取付けた2台のアクチュエータにより上下スタブを平行に維持し、かつ軸力を一定に保つように制御した。水平力は、試験体反曲点高さに設置したアクチュエータにより正負交番繰返し载荷とした。水平力の载荷は層間変形角 $R (= \Delta / h_0, \Delta : \text{上下スタブ間の相対水平変位})$ で制御し、 $R=1/400$ を1回、 $1/200, 1/100, 1/50, 1/25$ を各2回繰り返すことを目標とした。

また、水平载荷実験終了後、残留水平変位をほぼゼロに戻し、軸力用アクチュエータにより一軸圧縮実験を実施し、軸方向耐力を確認した。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状

各試験体の水平加力実験終了後の破壊状況を写真1に示す。各試験体とも $R=1/200$ の载荷時までに柱頭、柱脚

に曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生し、 $R=1/100$ の载荷時に曲げおよびせん断ひび割れが進展、拡大し、圧壊も観察された。また、危険断面位置で主筋が降伏した。

NO.1 (無補強) は、 $R=+1/50$ の1サイクル目に圧縮隅角部を結ぶ対角線状に発生したせん断ひび割れが進展、拡大するとともに、主筋に沿った付着割裂ひび割れが顕著となった。 $R=-1/50$ の1サイクル目でせん断ひび割れ、および付着割裂ひび割れが拡大し、耐力が著しく低下した。最大耐力は $R=1/100$ の1サイクル目で得られ、最終破壊状況は、曲げ降伏後の付着割裂破壊をとまなうせん断破壊であった。

NO.2 (1/2補強) は、 $R=1/50$ の繰返しで曲げ、せん断ひび割れの拡大および圧壊が顕著となり、 $R=1/25$ の载荷時に対角線状のせん断ひび割れ、付着割裂ひび割れが発生し、コンクリートの圧壊、剥落が顕著となったが、耐力低下は小さい。最大耐力は $R=1/25$ の1サイクル目で得られ、最終破壊状況は曲げ破壊であった。

NO.3 (1/3補強) は、NO.2よりせん断ひび割れ幅が大きくなったが、NO.2同様の破壊性状を示し、 $R=1/25$ の繰返しまで耐力低下は小さかった。最大耐力は $R=1/50$ の1サイクル目で得られた。

NO.4 (1/2補強、3層、軸力比1/3) は、 $R=1/50$ の繰返しで対角線状のせん断ひび割れが発生し、NO.2よりコンクリートの圧壊、剥落が激しくなったが、最終破壊状況はNO.2同様曲げ破壊であった。最大耐力は $R=1/50$ の1サ

NO.5 (1/2加力直交方向補強) は、 $R=1/50$ の载荷時に

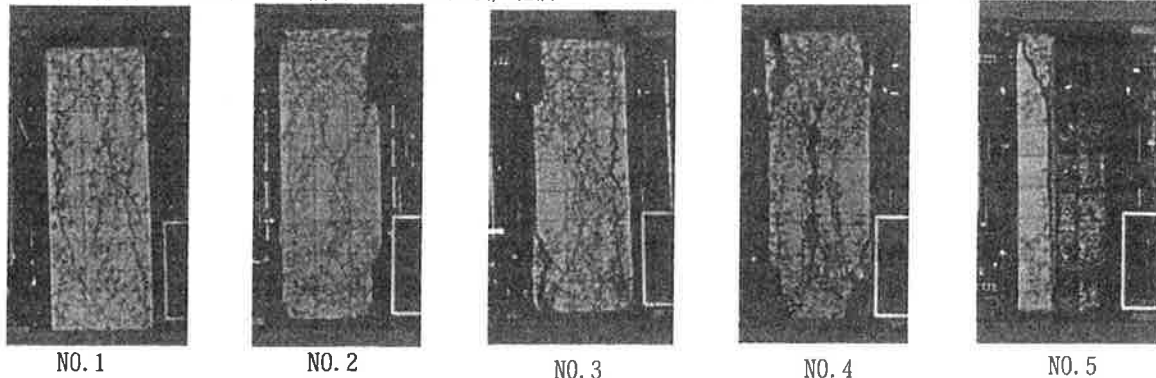


写真1 最終破壊状況

せん断ひび割れが定着プレートとの境界線に沿って進展、拡大し、+1 サイクル目で耐力が低下した。その後の変形の増大とともに、せん断ひび割れの拡大により、耐力がさらに低下した。最大耐力は $R=1/100$ で得られ、最終破壊状況は、曲げ降伏後のせん断破壊であった。

CFシート補強した試験体は、実験終了時までCFシートの破断、定着プレートとCFシート間のすべりは見られなかった。

3.2 水平力-層間変形角関係

各試験体の水平力-層間変形角関係を図3に示す。無補強試験体NO.1は、 $R=1/50$ の载荷時における付着割裂破壊をともなったせん断破壊により耐力が急激に低下し、変形性能に乏しい復元力特性を示した。一方、補強試験体NO.2~NO.4では、 $R=1/25$ の繰返しまで耐力低下が少なく、NO.1より変形性能に優れた復元力特性が得られた。補強断面を1/3としたNO.3の $R=1/25$ の2サイクル目における耐力低下は、補強断面を1/2としたNO.2よりやや大きく、補強断面を小さくすることにより、変形性能は若干劣る。加力直交方向に補強した試験体NO.5は、無補強試験体NO.1同様 $R=1/50$ の载荷時におけるせん断破壊により耐力が低下し、補強効果は見られなかった。

3.3 最大耐力

実験で得られた最大耐力と診断基準⁹⁾および改修指針¹⁾、靱性保証型指針²⁾を用いた曲げおよびせん断強度の計算値を表2に示す。

全試験体とも曲げ降伏先行型の破壊モードを示したが、実験で得られた最大耐力 P_{max} は、曲げ破壊したCFシート補強試験体で20%、せん断破壊した試験体で10%程度、計算曲げ強度 V_{mu} より高い値を示した。

3.4 変形性能

今回の実験では、全試験体ともせん断破壊が先行した破壊性状ではなかったため、CFシート補強した場合のせん断強度を直接評価できないが、以下に各計算せん断強度と計算曲げ強度の比(せん断余裕度)と限界変形角との関係を考察する。実験で得られた限界変形角 R_p 、およびせん断余裕度を表2に示す。限界変形角の実験値は、最大耐力の80%を2サイクルの载荷で確保した最大変形角と定義した。限界変形角 R_p は、曲げ降伏後にせん断破壊した試験体NO.1、NO.5で1.0%、CFシート補強したNO.2、NO.3で4.0%、軸力を高めた試験体NO.4で2.0%となり、本工法でCFシート補強することにより限界変形角が大幅に改善できる。

改修指針によるせん断強度を用いたせん断余裕度は、全試験体とも1.0以下となっており、曲げ破壊した補強試験体の変形性能を評価できない。一方、靱性保証型指針を用いたせん断余裕度は、曲げ破壊型の試験体NO.2~NO.4で1.3以上、曲げ降伏後のせん断破壊した試験体NO.1、NO.5で0.6となり、改修指針によるせん断強

度を用いた場合より、実験で得られた破壊モードとの整合性は高い。

改修指針では、補強断面の異なる、例えば試験体NO.2、NO.3のせん断強度は同じ値となり、せん断余裕度から変形性能を適切に評価することはできない。一方、靱性保証型指針によるせん断強度計算式では、補強断面による影響がトラス機構の有効係数(横補強筋の断面方向の最大間隔)で評価できる。また、靱性保証型指針によるヒンジ部材としてのせん断強度の計算

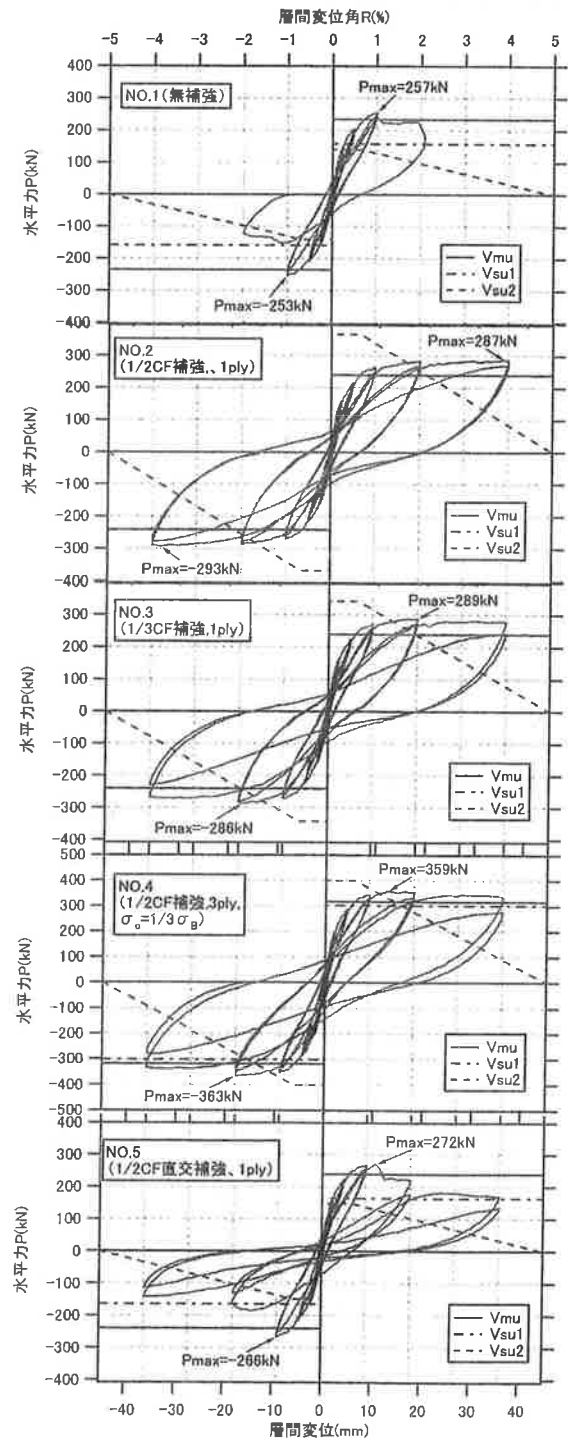


図3 水平力-層間変形角関係

表2 実験で得られた最大耐力と計算値

試験体	最大耐力の実験値 P_{max} (kN)	曲げ強度 ¹⁾ V_{mu} (kN)	せん断強度(kN)			限界変形角の実験値 R_p (%)	限界変形角の計算値 R_p (%)	軸圧縮耐力 N_{max} (kN)	軸圧縮耐力の計算値 $N_{max}/\epsilon N$
			V_{su1} ²⁾	V_{su2} ³⁾	V_{su3} ⁴⁾				
NO.1	256	234 [1.09]	158 (0.68)	140 (0.60)	175 (0.75)	1.00	-	-1304	-2720 (0.48)
NO.2	293	240 [1.22]	241 (1.00)	367 (1.53)	285 (1.19)	4.00	2.17	-2503	-2847 (0.88)
NO.3	289	240 [1.20]	240 (1.00)	342 (1.43)	276 (1.15)	4.00	1.96	-1785	-2825 (0.63)
NO.4	363	317 [1.15]	302 (0.95)	400 (1.26)	287 (0.91)	2.00	1.56	-2093	-2900 (0.72)
NO.5	272	240 [1.13]	164 (0.68)	148 (0.62)	188 (0.78)	1.00	-	-1401	-2877 (0.49)

1), 2)改修指針による曲げ強度とせん断強度
3), 4)靱性保証型によるせん断強度と付着割裂破壊強度
5) V_{mu} と V_{su2} から求めた限界変形角
6) $N = 0.85A_g \sigma_g + \sigma_g \sigma_y$
[]は P_{max}/V_{mu} の値、()は計算曲げ強度に対する計算せん断強度の比

式では、部材の変形とともにトラスの角度を小さくし、また、コンクリートの有効係数を低減させるため、直接的にせん断強度が曲げ強度を下回る時の変形が評価できる。靱性保証型指針による計算せん断強度を用いて求めた各試験体の限界変形角（せん断強度が曲げ強度を下回るときの変形角 R_p ）を表2に示す。CFシート補強した試験体NO. 2、NO. 3、NO. 4の計算限界変形角 R_p は2.2%、2.0%、1.6%となり、実験で得られた限界変形角 R_p をかなり安全側に評価しているが、実験結果をおおよそ評価することができる。

3.5 軸方向耐力

一軸圧縮実験で得られた軸圧縮耐力を表2に示す。軸圧縮耐力 N_{max} は、NO. 2、NO. 4、NO. 3、NO. 5、NO. 1の順に高い値を示し、CFシートと通しボルトで擬似的に閉鎖型となるように補強し、破壊モードを曲げ降伏後のせん断破壊から曲げ破壊型とすることにより、軸圧縮耐力を高めることができる。軸耐力の計算値 N に対する実験値の比は、せん断破壊性状を示した試験体NO. 1、NO. 5で0.5、曲げ型の破壊性状を示した試験体NO. 2～NO. 4で0.6～0.9程度となった。

3.6 定着プレートとCFシートの付着強度

水平加力実験および一軸圧縮実験終了時まで、定着プレートの損傷やCFシートの破断は見られなかった。また、CFシートの引張ひずみは、水平加力実験では変位の増大とともに、一軸圧縮実験では軸方向力の増大とともに増大し減少することはなかった。

水平加力実験および一軸圧縮実験における定着プレ

ト1枚当たりのCFシートの張力（定着プレートの設置面）の最大値は、試験体NO. 4で29kN、73kNであった。このCFシートの張力を定着プレートとCFシート間の平均付着応力度に換算すると、それぞれ4N/mm²、9N/mm²であり、補強設計で仮定した付着強度5N/mm²以上を確保している。

4. おわりに

CFシートを通しボルトと定着プレートを用い、擬似的に閉鎖型補強することにより、曲げ降伏後の付着割裂破壊をとともなうせん断破壊から曲げ型の破壊性状とすることができ、変形性能を向上させる効果が確認された。また、本補強方法を用いた場合の最大耐力、変形性能を既往の計算式で評価した。今後、袖壁等の雑壁が取り付く柱を対象とした場合の補強性能を確認する必要がある。

謝辞

本研究を推進するに当たり、有意義なご指導を頂いた東京理科大学工学部教授松崎育弘先生に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，2001
- 2) 日本建築防災協会：連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，1999
- 3) 近藤，他：炭素繊維シートによる直交壁を有する柱の補強方法に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集大会，1999，pp. 17-18.
- 4) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2001
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999

Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Columns using Carbon Fiber Sheets

S.Hakuto, J.Ozawa and M. Aoki

Five 3/8 scale reinforced concrete columns were designed and constructed according to the old design standard. One test unit was tested as-built under the simulated seismic loading, to obtain its seismic performance. The other test units were retrofitted by carbon fiber sheets using the reinforcing bars and steel plates to form the enclosed form for the column cross section and then tested. The effects of the retrofit method on the seismic performance were investigated in terms of displacement ductility. It was found that the retrofit method was effective to improve the displacement ductility of the existing columns. One evaluation method to obtain the displacement ductility of the columns retrofitted by the carbon fiber sheets was also proposed.