

論文 GFRC と炭素繊維シートによる柱の耐震補強に関する実験的研究

石渡康弘*¹ 市川昌和*¹ 中島英一*² 荒川玄*³

要旨：本論文は、主に鉄筋コンクリート（以下：RC）造柱を対象とした、新しい耐震補強法を開発することを目的として行った載荷実験の結果および考察について述べたものである。実験因子を工法の相違、炭素繊維シート（以下：シート）量等として、無補強柱と比較することにより、本工法による補強効果について確認した。その結果、本補強法は、柱の耐震補強として有効であり、シート量を増すに従い、柱の変形能を改善できることが確認できた。

キーワード：耐震補強、炭素繊維シート、モルタル成形板、鉄筋コンクリート柱

1. はじめに

現在、RC 造柱を対象とした耐震補強法として、従来から実施されてきた RC 巻き立て工法、鋼板巻き立て工法等のほかに、最近では、軽量で高強度の炭素繊維やアラミド繊維等の新素材を用いた工法が注目を浴び、盛んに研究が進められている[例えば文献 1), 2)]。しかし、建築物の補強を行う場合、鋼板補強では重量物の搬入、溶接作業等があり、重機等を使用するため、室内での施工には必ずしも適していない。また、新素材を用いた補強の場合では、RC 柱の下地や隅角部の処理が必要となるため、粉塵や騒音等の発生という問題点があった。さらに、建築物の場合では、最後に耐火性を考慮した仕上げが必要となり、工期が比較的長くなる傾向にある。

そこで、筆者等は、引張強度が 1500N/mm²程度ガラス繊維メッシュとガラス短繊維で補強された、高強度のモルタル成形板（以下：GFRC）とシートを用いた新しい補強法を提案した。本工法の概要を図-1に示す。

予めシートを貼り付けたコ型の GFRC を補強対象柱にセットし、シートの継手のみを現場で施工する。その後、GFRC と RC 柱の隙間に

グラウトを注入する。本工法の場合、グラウトを注入して RC 柱と一体化させるため、RC 柱の下地処理、隅角部の処理が不要となり、さらに、GFRC の表面が非常に平滑であり、仕上げの下地として利用できるため、仕上げ等も含めた耐震補強工事が、比較的短工期で施工できる長所がある。

本研究では、GFRC とシートを用いた補強法の補強効果を把握することを目的とし、シート直巻き工法や無補強の試験体も含めて静的載荷実験を行った。

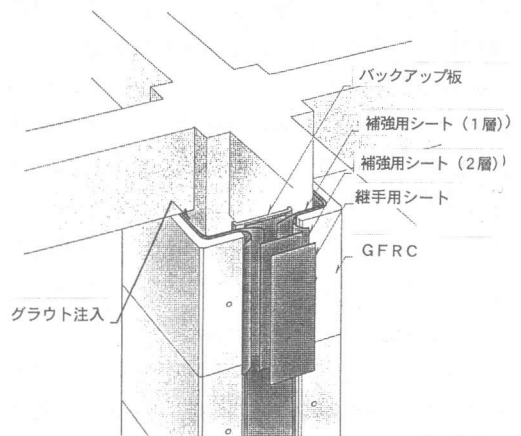


図-1 工法概要

* 1 鉄建建設(株)技術研究所 (正会員)

* 2 鉄建建設(株)技術研究所

* 3 大木建設(株)技術研究所

表-1 試験体諸元

No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
試験体名	RC-14	CRC-21	CRC-26	GRC-26P	GRC-32P	GRC-38P	
補強方法	無補強	シート		GFRC+シート			
せん断補強	既存RC: pw1(%)	0.14					
	補強部分	無し	全面1層	全面2層	全面2層	全面3層	全面4層
	シート: pw2(%)	0.00	0.07	0.13	0.12 ^{注1)}	0.18 ^{注1)}	0.24 ^{注1)}
	Σpw(%)	0.14	0.21	0.27	0.26	0.32	0.38
材料強度	コンクリート(N/mm ²)	25.5	27.0	27.9	29.6	29.9	29.3
	GFRC(N/mm ²)	—	—	—	92.5	93.5	93.0
	グラウト(N/mm ²)	—	—	—	61.1	52.8	61.2
共通事項	・柱断面: b(柱幅)×D(柱径)=50×50(cm) ・クリアスパン: h ₀ =150(cm), シアスパン比: M/QD=1.50 ・柱主筋: 12-D22(p _g =1.86%), 帯筋: 2-D10@200 ・軸力比: η ₀ =N/bDσ _B =0.2 N: 軸力, σ _B : 実験時コンクリート圧縮強度 注1): GFRC+シート補強のpw2はグラウトによる断面増を考慮して算出						

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体の諸元を、図-2 に試験体配筋図を示す。試験体は RC 造柱を対象としており、計 6 体計画した。断面寸法は b×D=50×50cm、内法高さ 150cm (M/QD=1.5) とし、ほぼ実大クラスの断面を想定している。各試験体とも、主筋は 12-D22、帯筋は D10@200 とした。実験因子は工法の相違 (本工法, シート直巻き工法), シート補強量の違いである。

No.1 は比較のための無補強試験体, No.2, 3 はそれぞれ 1 層, 2 層のシートを直に巻き付け補強した試験体である。No.4~6 は本工法により補強した試験体であり, シートを 2~4 層と増している。シートの継手位置は, 2 層補強で直巻きの No.3 では, 継手位置が重ならないようにずらして設けている。それに対し, 本工法を採用した No.4~6 では, 継手位置が一カ所に集中 (全数継手) している。いずれの工法においても, 重ね継手長さは 10cm とした。また, 本工法ではシートと RC 躯体の隙間にグラウトを注入するため, シートはグラウト部と接着されていない状態となっている。それに対し, No.2, 3 のシート直巻き工法では RC 躯体とシートはエポキシ樹脂により接着されている。

試験体の製作は, ほぼ実施工と同様に行った。GFRC+シート補強 (No.4~6) で, シートを

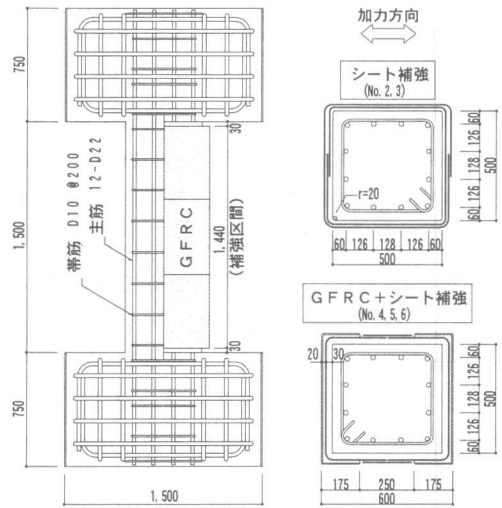


図-2 試験体配筋図

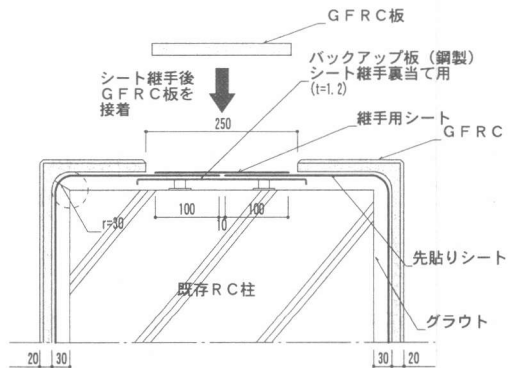


図-3 継手部詳細図

確実に継手するために厚さ 1.2mm の鋼製のバックアップ板を設け, 次に, 予め必要枚数の

シートを貼り付けた高さ 48cm のコ型の GFRC を、柱を挟み込むように両側から 3 段に積んだ後、補強用のシートと継手用のシートを交互に貼り、その後、継手部に GFRC 板を接着し（図-3 参照）、最後にグラウトを上部隙間から注入して既存柱と一体化している。シート補強の試験体（No.2, 3）では、RC 表面を目荒らし、プライマー塗布を順次行った後、幅 22~25cm のシートをエポキシ樹脂で巻き付けた。また、シート補強の試験体では、柱の隅角部に $r=20\text{mm}$ の面取りを行った。

2.2 使用材料

使用した材料は全て共通で、コンクリートは設計基準強度 $F_c24(\text{N}/\text{mm}^2)$ の普通コンクリートを、主筋には SD345 の D22 を、帯筋には SD295 の D10 を用いた。補強材のシートは繊維目付 $300\text{g}/\text{m}^2$ のクロスシートを用いた。コンクリート、GFRC、グラウトの圧縮強度を表-1 中に、鉄筋とシートの力学特性を表-2 に示す。

2.3 加力方法および計測方法

図-4 に加力装置図を示す。加力は、L 型の載荷梁に取り付けた 5000kN ジャッキにより一定軸力 ($0.2 \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B$) を加えた状態で、パンタグラフにより載荷梁の平行度を保ちながら、柱の反曲点位置に取り付けた 1500kN ジャッキにより荷重と変形を加える建研方式で行った。

加力サイクルは図-5 に示すように、柱の層間変形角 R で制御し、 $R = \pm 1/200$ 以降各変形を 2 回繰り返した後、正方向に押し切ることを標準としたが、急激な耐力低下などがみられたときはその時点で加力を終了した。

計測は、軸力・水平荷重をロードセルにより測定し、層間変形・軸変形などを変位計で、シート・柱主筋および帯筋の歪をワイヤーストレインゲージにより測定した。

3. 実験結果

表-3 に実験値と計算値の関係を示す。無補強の No.1 では、 $R=1/400$ までに柱に曲げひびわれ、曲げせん断ひびわれが生じ、 $R=1/200$

表-2 鉄筋とシートの力学特性

	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び (%)	備考	
鉄筋	D22	390	201000	567	22	No.1~No.3
		424	190000	598	34.9	No.4~No.6
	D10	307	176000	433	23.2	No.1~No.3
		369	188000	502	20.7	No.4~No.6
シート	—	230000	4181	1.5 ^{注2)}	全試験体	

注2): シート伸びはメーカーカタログ値

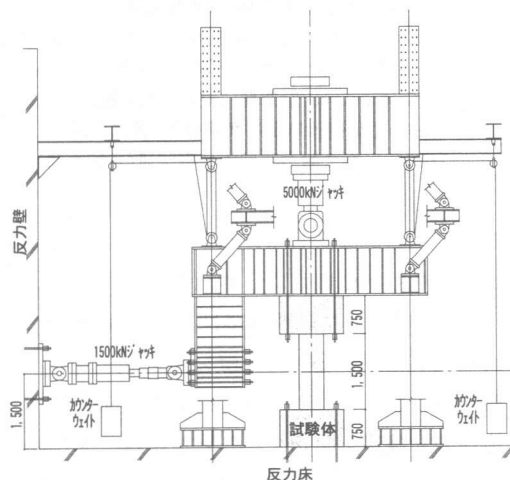


図-4 加力装置図

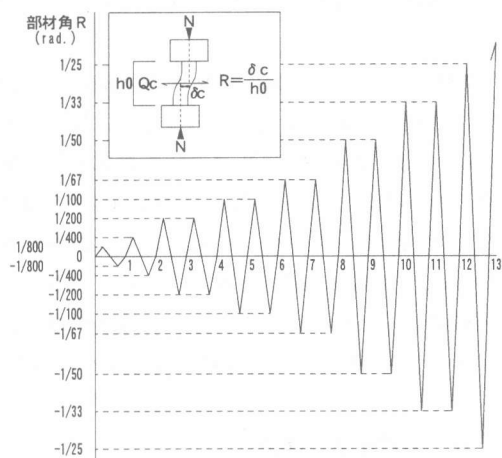


図-5 加力サイクル

の繰り返し時にせん断ひびわれが生じた。 $R=1/200$ で最大耐力に達し、以降の加力で対角線上に生じたせん断ひびわれが拡大し、 $R=-1/100$ で急激な耐力低下を示した。No.1 では、実験値が曲げ強度の計算値に達していないこと、

表-3 実験結果一覧

No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
試験体名	RC-14	CRC-21	CRC-26	GRC-26P	GRC-32P	GRC-38P
補強方法	無補強	シート		GFRC+シート		
eQmax (kN)	624	800	836	908	896	875
cQmu (kN)	675	698	702	756	762	756
eQmax/cQmu	0.92	1.15	1.19	1.20	1.18	1.16
eRy (rad.)	—	1/114	1/141	1/172	1/185	1/185
eRmax (rad.)	1/209	1/101	1/70	1/100	1/67	1/99

- eQmax: 最大耐力実験値(正加力時)
- cQmu: 曲げ降伏時せん断耐力計算値³⁾ $cQmu = \sum Mu/h_0$
 $Mu = 0.8 \cdot at \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D(1 - N/b \cdot D \cdot \sigma_B)$ at: 引張主筋断面積 σ_y : 主筋降伏強度
- eQmax/cQmu: 計算値に対する実験値の比
- eRy: 主筋降伏時部材角実験値(正加力時)
- eRmax: 最大耐力時部材角実験値(正加力時)

および主筋が降伏していないことより、曲げ降伏前にせん断破壊したと考えられる。

一方、補強した試験体では、全ての試験体で、実験値が曲げ強度の計算値を上回っており、補強を行ったことによりせん断耐力を向上させ、脆性的な破壊を防止することが確認できた。

シートを直巻きした No.2, 3 では、実験終了までシートの破断がみられず、内部のコンクリートの圧壊により柱が膨らむような破壊状況を示した。

GFRC+シート補強の試験体では補強量の違いで、最終状況に変化がみられた。2層補強の No.4 では、 $R=1/33$ 以降にシートの部分的な破断(柱隅角部)がみられ、端部で GFRC の部分的な剥離がみられた。それに対し、3層補強の No.5, 4層補強の No.6 では最後までシートの破断はみられず、GFRC には多数のひびわれが生じたが、最後まで剥離等はみられなかった。

4. 実験結果の検討

4.1 変形状

図-6 に代表的な試験体の荷重-変形関係(以下: $Q_c - \delta_c$ 関係)として、無補強の No.1, シートを直巻きした No.3, 本工法により補強した No.4 の結果を示す。図-7, 8 に各工法ごとにシート補強量を変えた試験体の $Q_c - \delta_c$ 関係の包絡線を、図-9 に補強量が同じで工法

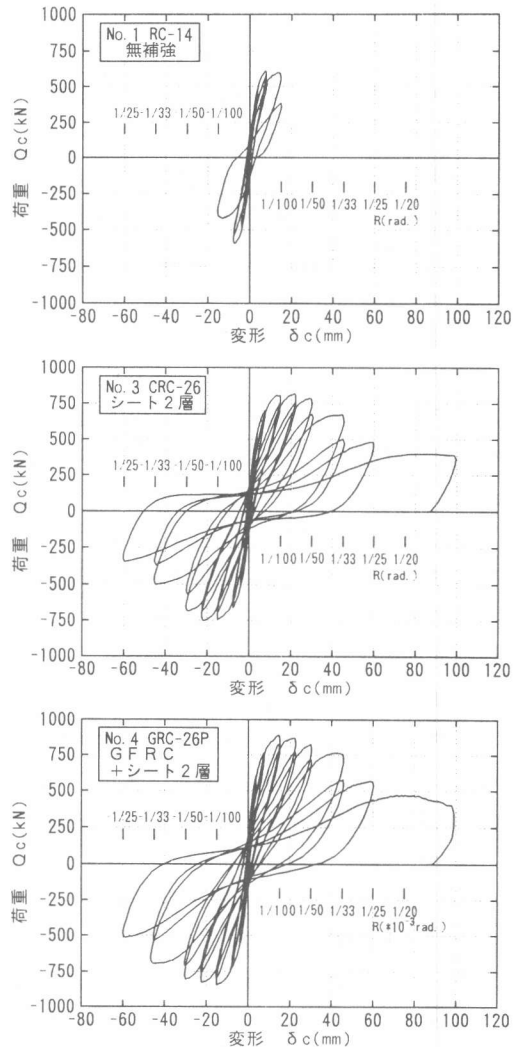


図-6 $Q_c - \delta_c$ 関係

を変えた試験体の包絡線をそれぞれ示す。以下、各因子が変形性状に及ぼす影響について検討する。

(1) シート量によるせん断補強効果

図-7, 8より, シート量によるせん断補強効果の検討を行う。

工法の違いによらず, 無補強の No.1 と比較して履歴性状が大幅に改善されている。各試験体とも最大耐力は $R=1/100\sim 1/67$ 時に示しているが, 補強量を増すことにより, 最大耐力以降の耐力低下が小さくなっている。特に, 負側で, 補強量を増すことによる履歴性状の改善効果が顕著にみられる。

(2) 工法の違いによる影響

図-9より, 2層のシートにより補強された No.3 と No.4 について比較を行い, 工法の相違による影響について検討する。

GFRC+シート補強を行った No.4 の方が, シートを直接巻き付けた No.3 より全般的に大きな実験値を示している。特に, 負側でその傾向が著しい。これは, 計算上考慮していない GFRC とグラウトが柱のせん断補強に有効に働いていることによると思われる。

本工法の場合, シートとグラウト間には接着力が無い状態となっているが, 本工法の試験体の方がシートを直巻きしたものより優れた変形性状を示していることから, シートと躯体との接着力の有無は履歴性状に影響を及ぼさないとと思われる。

4.2 軸方向変形の比較

図-10に代表的な試験体の軸変形 δv と Q_c の関係を示す(軸変形は伸びる側を+で, 縮む側を-で示す)。

同図よりシートを直巻きした試験体では, 大変形時において軸方向に大きく縮み出し, 最終では $4\sim 5\text{mm}$ の値を示した。それに対し本工法による試験体では最終加力時においても 2mm 以下であり, 全般的に軸方向変形が小さい。これは, GFRC とグラウトが, 軸方向変形(軸縮み)を拘束する効果があるためと思われ

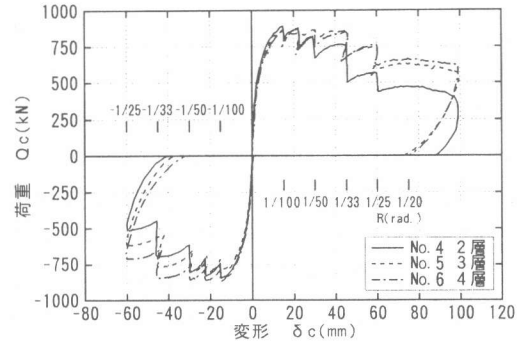


図-7 シート量による影響
(本工法)

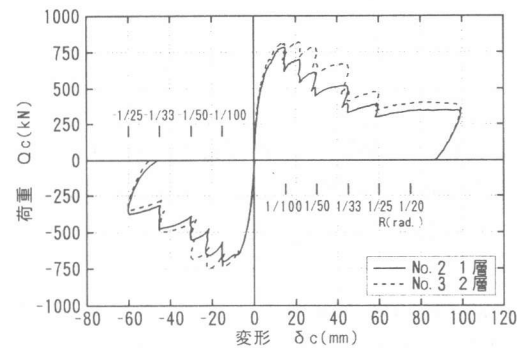


図-8 シート量による影響
(シート直巻き工法)

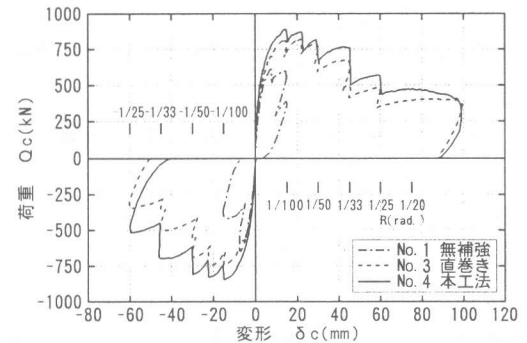


図-9 工法の違いによる影響

る。

4.3 シートの歪度分布

図-11に補強を行った試験体の $R=+1/67$ 時のシートの歪度分布を示す。また, 図-12に同じ試験体の各サイクル正載荷ピーク時(1回目の繰り返し)の平均歪度 $\text{ave } \epsilon_c$ を示す(ここに, 平均歪度 $\text{ave } \epsilon_c$ とは軸方向の歪度分布の平均値である)。

図-11, 12より同じシート量(2層)のNo.3(シート直巻き), No.4(本工法)を比較する。柱とシート間の接着の有無に関わらず, 同じ補強量であれば, 歪度分布と平均歪度の増加状況がほぼ同じであることがわかる。

補強量の影響については, 全般的に, 補強量が増すにつれ, シートの歪度の値が小さくなる傾向がみられた。しかし, 1層補強(No.2)と, 2層補強(No.3, 4)を比較すると, 大変形時($R=1/33$ 以降)では, ほぼ同じ歪度を示しており, シートが負担できる力には上限があると思われる。

5. まとめ

既存 RC 建造物の柱の耐震補強を目的として, 新たな補強法を提案し, その補強効果確認のための静的載荷実験を行った結果, 以下のことが明らかになった。

- (1)今回提案した補強法はシート直巻き工法と同等以上の変形性状が得られた。また, シートと柱の接着の有無は変形性状に影響が無いことが確認できた。
- (2)補強量を増すことで, 最大耐力以降の変形性状が向上する。
- (3)GFRC とグラウトは軸方向変形(軸縮み)を拘束する効果がある。
- (4)工法によらず, シート量が同じであれば, ほぼ同じ歪度を示している。

【謝辞】本研究は, 新日本製鐵(株), 岡部(株), ゴトウコンクリート(株), 東燃(株)との共同研究である。また, 東京理科大学松崎育弘教授, 東京理科大学中野克彦氏には, 実験の計画, 実施にあたり, ご指導・助言を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1)日本建築学会・構造委員会:連続繊維補強材のコンクリート構造への応用,日本建築学会大会, 構造部門 PD 資料,1998

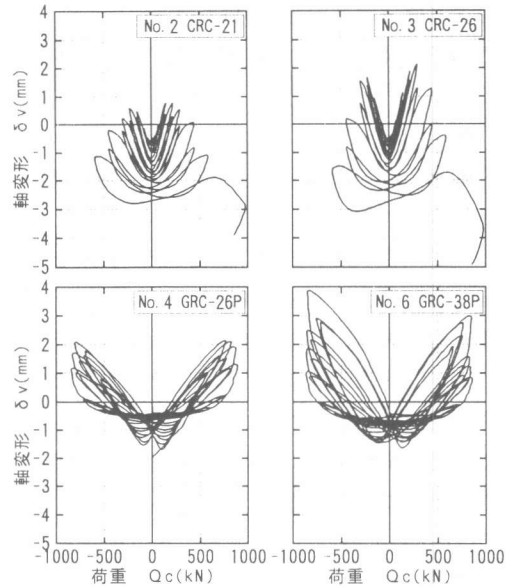


図-10 Qc- δv 関係

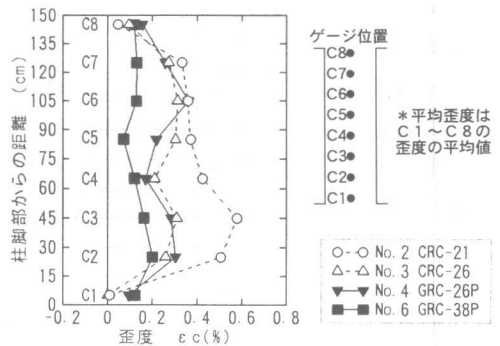


図-11 シートの歪度分布

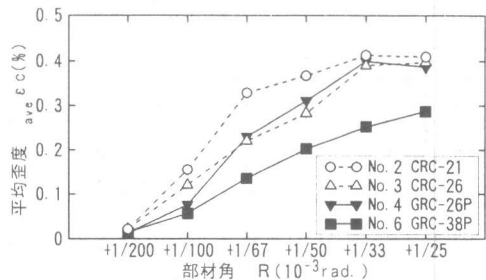


図-12 シートの平均歪度

- 2)日本コンクリート工学協会:連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム, 論文集,1998
- 3)日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料