

モルタル成形板と炭素繊維シートによる耐震補強工法の開発

鉄建建設(株) 石渡 康弘

鉄建建設(株) 市川 昌和

鉄建建設(株) 中島 英一

大木建設(株) 今津 賀昭

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、多くのコンクリート構造物に大きな被害が生じた。特に古い設計基準に基づき設計・施工された鉄筋コンクリート（以下、RC）造の建物・橋脚などにおいては、せん断破壊先行型の被害が多いことが報告されている。このような震災状況を受けて旧・設計基準により設計・施工された建物・橋脚などの耐震診断および耐震補強の重要性が改めて認識されている。現在、RC造を対象とした耐震補強工法としては、従来から実施されてきたRC巻き立て工法、鋼板巻き立て工法などの他、最近では軽量で施工性に優れていることから、連続炭素繊維シートなどの各種新素材を用いた工法が注目を集めている。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、溶接作業が必要であり、室内での施工には必ずしも適していない。また、シート補強の場合では、下地および柱隅角部の処理に伴う粉塵や騒音の発生などの問題点があった。さらに、建築物の補強においては最後に耐火性を考慮した仕上げが必要であり、工期も長くなるため建物を使用しながらの補強工事は難しかった。そこで筆者らは、ガラス繊維メッシュで補強された高強度のモルタル成形板（以下、GFRC）と連続炭素繊維シート（以下、シート）を用い、比較的短い工期で、仕上げが軽微で済む新しい補強工法を研究・開発し、実建物に適用した。本報告では、GFRCとシートを用いた耐震補強工法の概要を述べるとともに、補強効果確認のために行った実験概要、および旧基準で設計・施工されたRC造建物の1F中柱に適用した事例を紹介する。

2. 工法の概要

2.1 工法の特徴および施工手順

本工法により補強された柱の断面図を図-1に、施工手順を図-2に示す。これらの図に示すように、工場で製造されたコ型のGFRCの内面に予めシートを貼り付けた状態で現場へ搬入し、補強対象柱にセットした後、GFRCの蓋と支保工をセットし、RC柱とGFRCの隙間にグラウトを注入して一体化させる工法である。本工法の利点として、以下のことが挙げられる。グラウトをシートとRC柱の隙間に注入するため、RC柱の隅角部の処理や下地処理が不要である。また、現場で、シートに樹脂を用いる箇所が継手部のみであるため、臭気が最小限に抑えられる。さらに、GFRCの表面が緻密になっているため、仕上げが軽微で済み、GFRC単体の重量が軽量であるため、全て人力で施工できる。

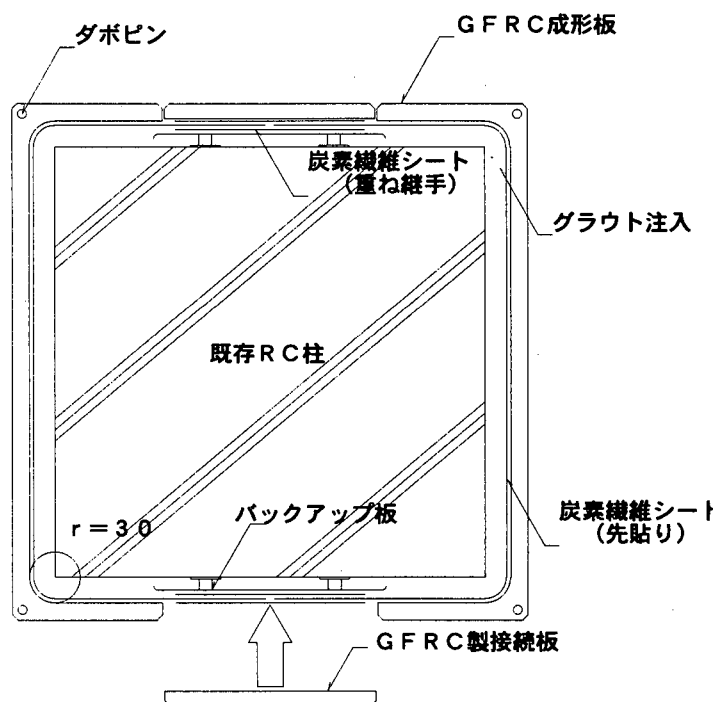
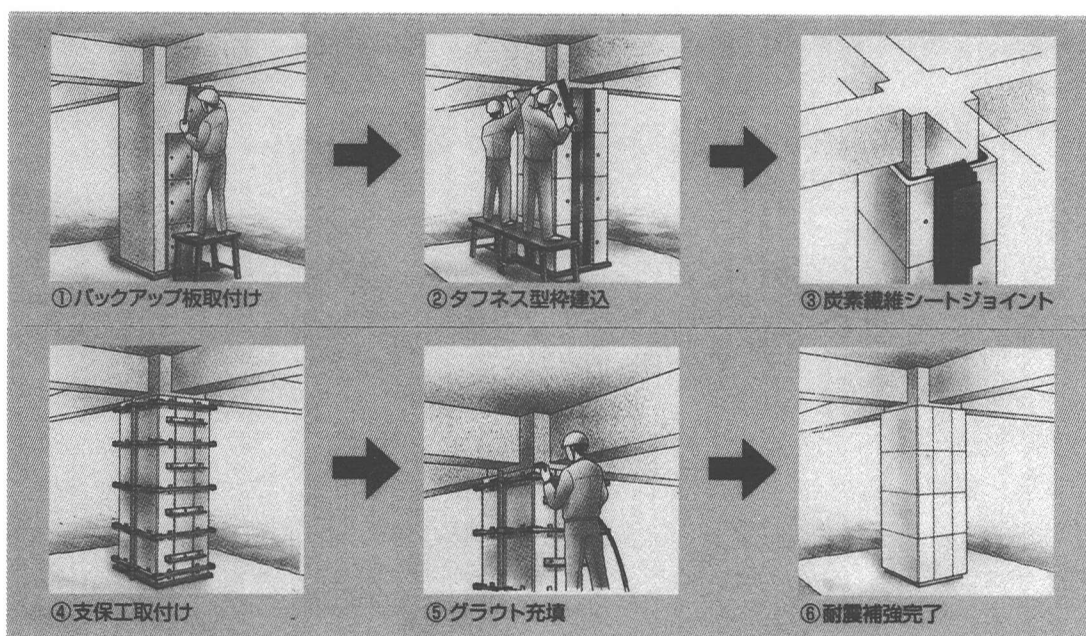


図-1 標準断面図

キーワード：GFRC、炭素繊維シート、RC部材、耐震補強

連絡先：千葉県成田市新泉9-1 鉄建建設(株)技術研究所 TEL0476-36-2360 FAX0476-36-2380



図－２ 施工手順

2.2 使用材料

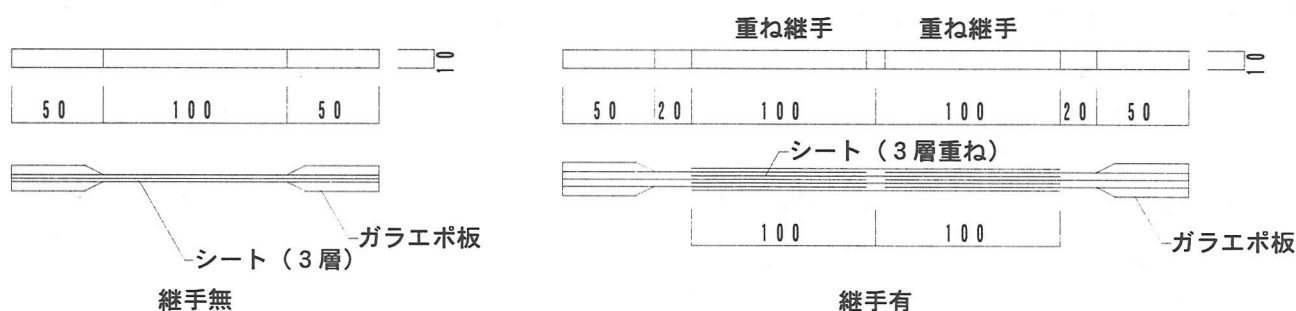
以下に本工法の主な使用材料を示す。

- (1) G R F C : G R F C は設計基準強度 100N/mm^2 のモルタルを、引張強度が 1500N/mm^2 のガラス繊維で補強した厚さ 20mm の成形板である。ガラス繊維メッシュは成形板の表と裏に 2 枚配置され、さらにガラス短繊維を混入して製造されている。高強度のガラス繊維を用いることにより、曲げにも強い構造となっている。
- (2) シート：シートは高強度、軽量かつ耐久性に優れており、引張強度が 3000N/mm^2 以上で、引張弾性率が 215kN/mm^2 である連続炭素繊維シート（クロスシート）を用いている。また、繊維結合剤にはエポキシ樹脂を用いている。
- (3) 注入グラウト：注入グラウトは流動性に優れ無収縮で安定した強度発現と耐久性を保持し、静荷重はもとより、動荷重を十分支持して力を均一に伝達できるものを用いている。現場で、水のみを加えてミキサーで均一に練り混ぜることで品質の安定したグラウトが得られるプレミックスタイプを採用している。

3. 補強効果確認試験

3.1 シートの継手確認試験

本工法では、シートの継手を同一箇所を重ね継手としている。在来のシート補強の場合は、継手位置をずらし、同一箇所に設けないのが一般的である。そこで、シートの継手強度を確認するために、引張試験を実施した。試験片形状を図－３に示す。試験片は重ね長さを 100mm とし、継手位置を同位置箇所（全数継手）に設けて、継手のないものと比較した。なお、試験はシートが 2 層と 3 層の場合について行った。



図－３ 継手強度確認のための試験片形状

引張試験結果を図-4に示す。試験結果によると、実験結果のばらつきも含めて重ね継手長さを100mm以上確保すれば、全数継手としても保証強度以上確保していることがわかる。ここで、保証強度とは試験片の面積にシートの引張強度（カタログ値）を乗じて求めたものである。

3.2 じん性実験

3.2.1 実験概要

表-2に試験体の諸元を、図-5に試験体形状図を示す。

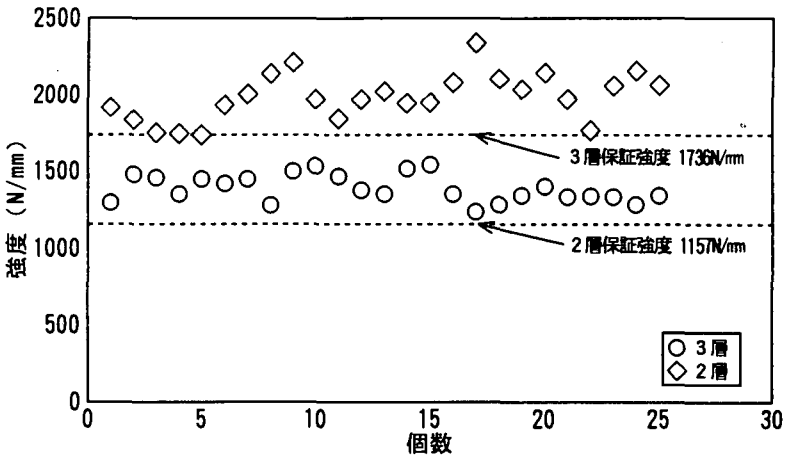


図-4 継手強度の試験結果

表-2 試験体一覧

No.		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
試験体名		RC-14	CRC-21	CRC-26	RC-14R	GRC-26P	GRC-32P	GRC-38P
補強方法		RC	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3層	全面2層	全面3層	全面4層
	pw2(%)	0.00	0.07	0.12	0.18	0.12	0.18	0.24
	Σ pw(%)	0.14	0.21	0.26	0.32	0.26	0.32	0.38
fc'(N/mm ²)		25.5	27.0	27.9	27.8	29.6	29.9	29.3
GFRC(N/mm ²)		—	—	—	101.0	92.5	93.5	93.0
グラウト(N/mm ²)		—	—	—	58.1	61.1	52.8	61.2
継手位置			加力方向と垂直			加力方向と平行		
共通事項		・柱断面 : b×D=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%) ・軸力比 : σ ₀ =0.2・b・D・fc'						

試験体はRC造柱を対象としており、計7体計画した。断面寸法は $b \times D = 50 \times 50\text{cm}$ 、内法高さ150cm ($M/QD = 1.5$)とし、ほぼ実大クラスを想定している。各試験体とも、主筋は12-D22、帯筋はD10@200とした。実験因子は補強方法の違い、補強量の違い、および継手位置の違いである。

No.1は無補強、No.4～7はGFRC+シート補強した試験体で、継手位置をNo.4は加力方向に対して垂直方向に、No.5～7では加力方向と平行（直接せん断応力が生じる面）に設けた。No.2、3はシートを柱に直に巻き付ける在来工法で補強した試験体である。また、No.4は被災後の補修・補強を想定した試験体で、No.1の加力終了後ひびわれ部にエポキシ樹脂注入による補修を行った後、GFRC+シートで補強

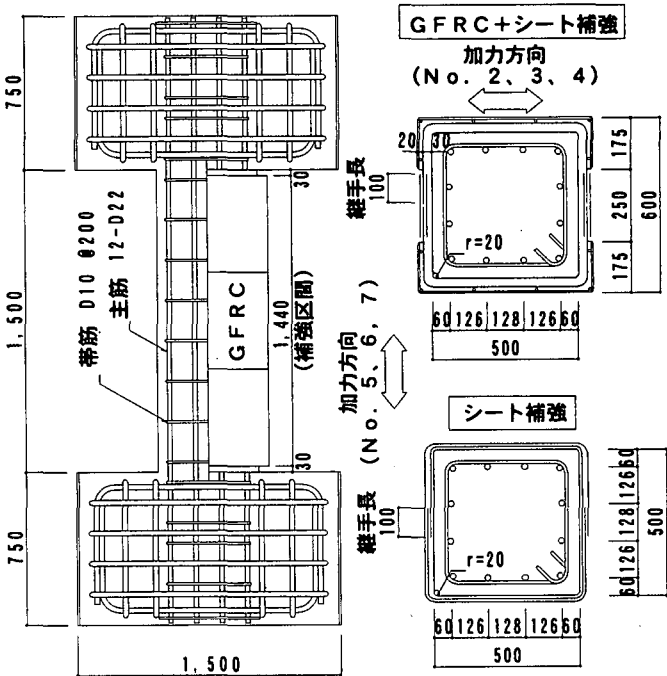


図-5 試験体形状図

した試験体である。

試験体の製作は、ほぼ実施と同様に行った。GFRC+シート補強は、予めシートを貼り付けた高さ 48cm のコ型のGFRCを3段に積んだ後、シートの継手部を施工（図-6 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）は、既存柱をワイヤーブラシなどで目荒らした後、プライマー塗布、パテによる穴埋めを順次行った後、幅 22~25cm のシートをエポキシ樹脂を含浸させながら巻き付けた。

シートを直接巻き付ける試験体（No. 2、3）以外は、柱の隅角部の面取りを行っていない。

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 $F_c 24$ 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 300g/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-2中に、鉄筋とシートの力学特性を表-3に示す。

3.2.2 加力方法および計測法

加力装置図を図-7に示す。加力は、載荷梁に取り付けた 5000kN ジャッキにより一定軸力 $0.2 \cdot b \cdot D \cdot f_c'$ （ b は柱幅、 D は柱せい、 f_c' はコンクリート圧縮強度）を加えた状態で、パンタグラフにより載荷梁の平行を保ちながら、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逆対称加力方式により行った。

加力サイクルは図-8に示すように、柱の層間変形角（ $\delta c/h_0$ 、 δc :柱の層間変形、 h_0 :柱の内法高さ） 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。

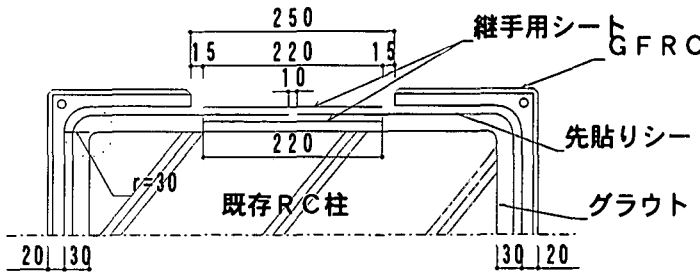


図-6 継手部詳細図

表-3 使用材料の力学特性

		降伏強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)	備考
鉄筋	D22	390	201	567	22	No.1～No.4
		424	193	598	34.9	No.5～No.7
	D10	307	176	433	23.2	No.1～No.4
		369	188	502	20.7	No.5～No.7
シート		—	230	4181	1.5 ^{*1}	全試験体

*1:シートの伸び量はメーカーカタログ値

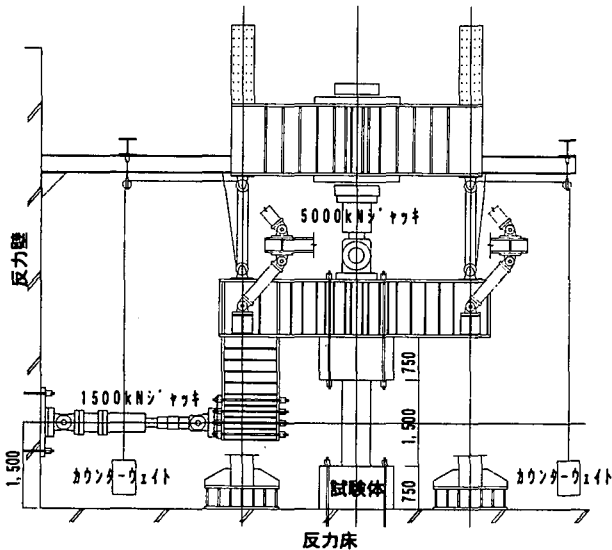


図-7 加力装置図

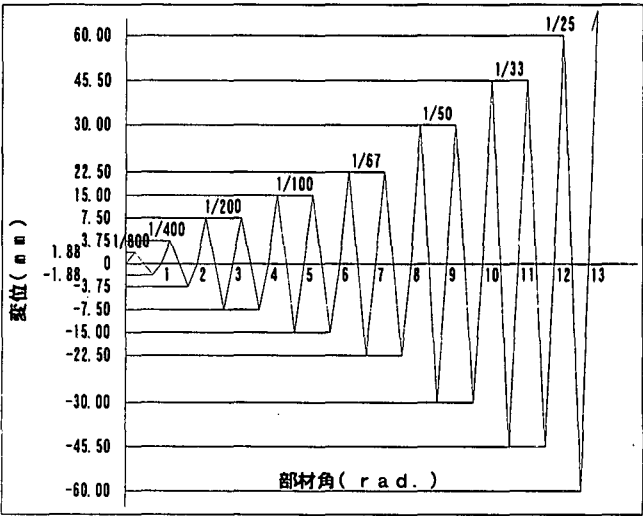


図-8 加力サイクル

3. 2. 3 実験結果および検討

(1) 実験結果

表－4に実験値と計算値の関係を示す。同表より無補強の No. 1 では、実験値が曲げ強度の計算値に達しておらず、主筋が降伏していないことから曲げ降伏前にせん断破壊したと考えられる。一方、補強を行っ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。以下、実験経過について述べる。

無補強の No. 1 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、 $R=1/200$ 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、 $R=-1/100$ 時に急激な耐力低下を示した。補強を行った試験体 No. 2～7 では、最大耐力 ($R=1/100\sim1/67$) まではほぼ同様な実験経過を示したが、最大耐力以降では補強法の違いにより差がみられた。シートを直接巻き付けた 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。それに対し、GFRC+シート補強の試験体では補強量の違いによりシートの破断状況が違っていた。2層補強の No. 5 では、 $R=1/33$ 以降にシートの部分的な破断がみられたのに対し、3層補強の No. 4、6、4層補強の No. 7 では最後までシートの破断はみられなかった。また、シートが破断した試験体の柱端部 $0.5D$ (D は柱せい) 区間では、コンクリートが顕著に圧壊し、主筋の座屈も認められた。

表－4 実験結果一覧

No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
試験体名	RC-14	CRC-21	CRC-26	RC-14R	GRC-26P	GRC-32P	GRC-38P
補強方法	RC	シート		GFRC+シート			
eQmax (kN)	62.4	80.0	83.6	79.4	90.8	89.6	87.5
cQmu (kN)	67.5	69.8	70.2	68.2	75.6	76.2	75.6
eQmax/cQmu	0.92	1.15	1.19	1.16	1.20	1.18	1.16
eRy (rad.)	—	8.8/1000	7.1/1000	12.6/1000	5.8/1000	5.4/1000	5.4/1000
eRu (rad.)	5/1000	13/1000	19/1000	16/1000	19/1000	24/1000	27/1000

eQmax ; 最大耐力実験値 (正加力時)

cQmu ; 曲げ降伏時せん断力計算値 $cQmu=(Mu(u)+Mu(d))/h_0$

Mu(u), Mu(d) ; それぞれ、柱頭・柱脚の終局曲げ強度 h_0 ; 柱の内法寸法

$Mu=0.8\cdot at\cdot \sigma_y\cdot D+0.5N\cdot D(1-N/b\cdot D\cdot fc')$

at ; 引張主筋断面積 σ_y ; 主筋降伏強度 D ; 柱せい N ; 軸力 b ; 柱幅 fc' ; コンクリート強度

以上は、日本建築学会「鉄筋コンクリート終局強度型設計に関する資料⁽¹⁾」による

eQmax/cQmu ; 計算値に対する実験値の比

eRy ; 主筋降伏時部材角

eRu ; 終局部材角実験値 (荷重－変形関係の包絡線上で荷重が最大耐力の 80%に低下した時の部材角)

(2) 変形性状

図－9、10に No. 1 と No. 5 の荷重－変形関係 (以下、 $Qc-\delta c$ 関係) を、図－11～13に各工法毎、補強量別の包絡線の比較を示す。以下、各因子が $Qc-\delta c$ 関係に及ぼす影響について検討を行う。

図－9～12より、GFRC+シート補強の試験体と、シートを直接巻き付けた試験体について比較を行う。工法の相違によらず、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 $R=1/100\sim1/67$ 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、シート4層で補強した No. 7 では正負とも $R=1/33$ の繰り返し時においても耐力低下がみられなかった。

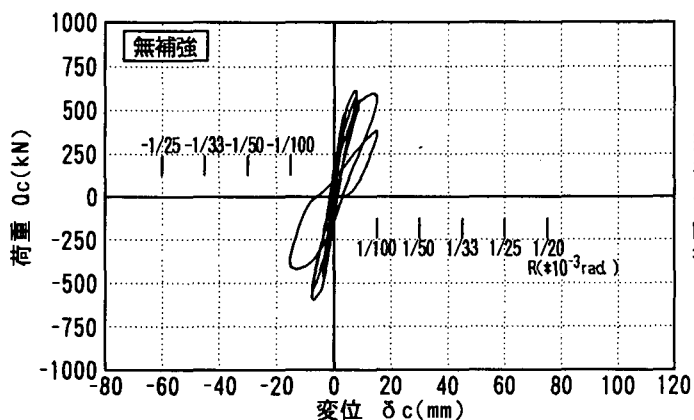


図-9 No.1 $Q_c - \delta_c$ 関係

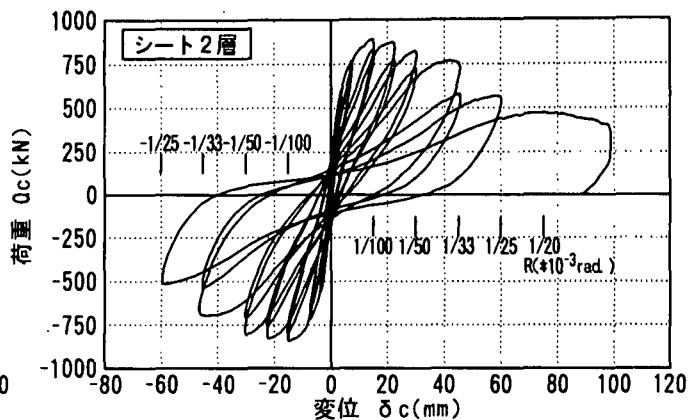


図-10 No.5 $Q_c - \delta_c$ 関係

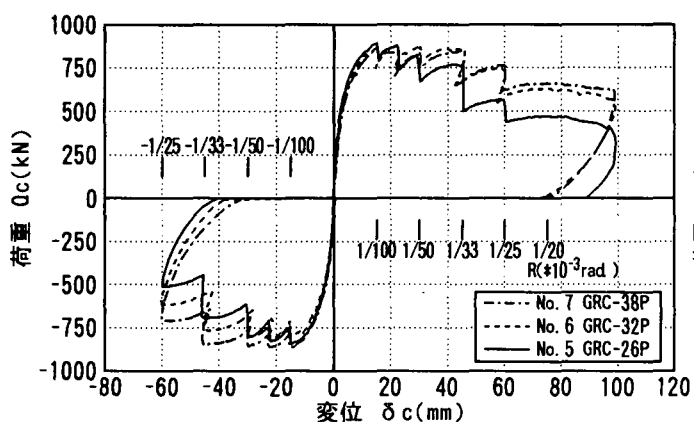


図-11 包絡線の比較 (GFRC + シート補強)

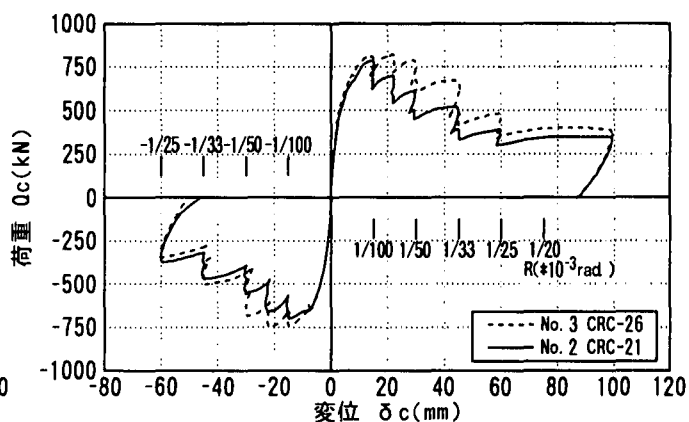


図-12 包絡線の比較 (シート補強)

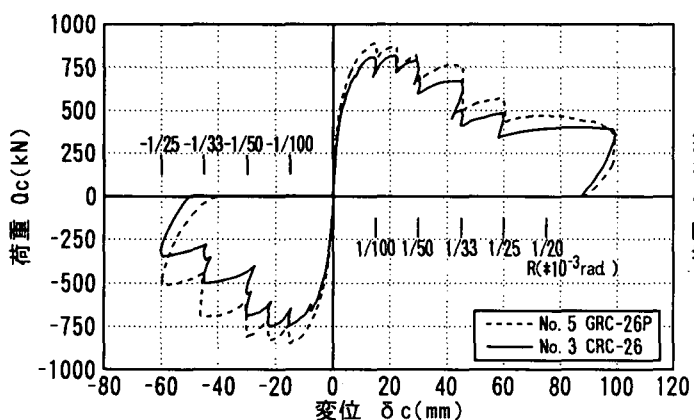


図-13 包絡線の比較 (工法の違い)

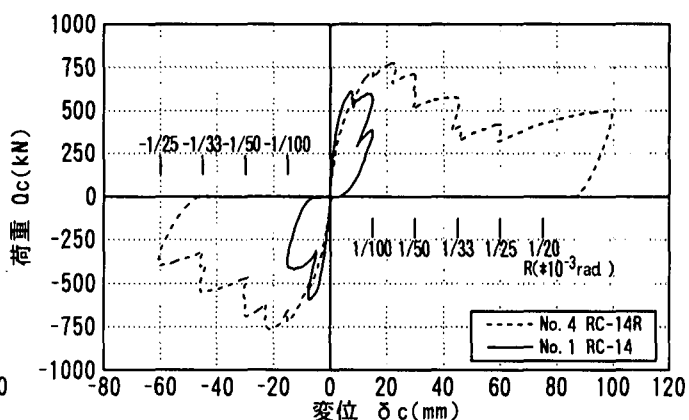


図-14 包絡線の比較 (補修後の補強)

図-13より、シート補強量が同じのNo. 3、とNo. 5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。本工法を採用したNo. 5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。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かなり有効に働いていることによるとと思われる。

図-14に被災後の補修・補強を想定し、No. 1がせん断破壊した後、エポキシ系樹脂をひびわれに注入し、補修を行った後、GFRC + シート3層によって補強を行ったNo. 4と無補強のNo. 1の包絡線を示す。No. 4は初期剛性において無補強のNo. 1より若干低い傾向を示したが、耐力は大きく上回り、曲げ耐力の計算値以上の実験値を示した。その後の変形性状も同じ補強方法同様耐力低下の少ない良好な結果を示した。以上より、いったんせん断破壊した部材でも十分な補修（ひびわれに樹脂を注入）を行い、シートなどを用いて補強を行えば、じん性に富んだ曲げ降伏型の部材にすることができる。

3.2.4 まとめ

既存RC造建物の柱の耐震補強を目的として、新たな補強方法を提案し、その補強効果確認のための静的荷重実験を行った結果、以下のことが判明した。

- (1) 今回提案した補強方法（GFRC＋シート）は在来の補強方法（シート）と同等以上の変形性状が得られることがわかった。
- (2) 補強量を増すことで、部材の変形性状が向上することが確認できた。
- (3) 継手の位置をせん断応力が発生する面に設けても問題がないことが確認できた。
- (4) 被災後の柱部材でも、十分な補修を行った後、適切な補強を行えば元の部材以上の耐力と、変形性状を得ることができる。

4. 実施建物への適用例

4.1 工事概要

今回補強の対象となったのは、神奈川県営S団地1階店舗部分の柱21本中の5本である。1階平面図を図－15に示す。S団地は昭和30年代に建築された地上5階建て、延べ面積1,700m²のRC造建築物で、1階が店舗、2階以上が共同住宅になっている。耐震補強は当初、鋼板による補強が計画されていたが、重量物の搬入が難しい点や、短工期で施工を完了するという点を考慮して、GFRC＋シート補強が採用された。補強工事は、高さ3mの柱（断面寸法650mm角）を準備工事などを含めて4日間で完了するものである。使用したGFRC1個の重量は約30kgであり、全て人力で施工した。GFRCを写真－1に示す。

設計は日本建築防災協会刊行の「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説⁽²⁾」にある、じん性指標 $F=3.0$ を満足することとした。計算の結果、繊維目付量300g/m²の炭素繊維シートを3層巻くものとした。

4.2 補強工事

補強工事は本工法の施工性を確認するために行った施工実験の結果を反映させて、以下のような手順で行われた。

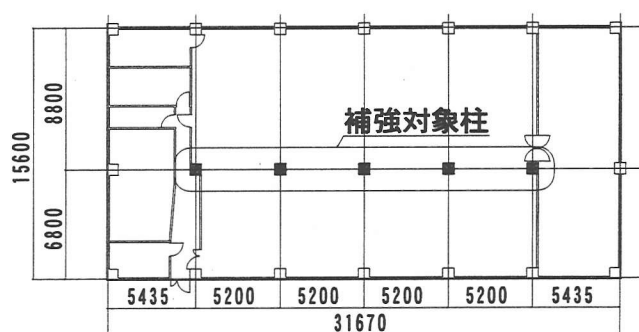
- 1日目：既存柱のモルタル浮き部分へのエポキシ樹脂注入、バックアップ板の取付などの準備工事。
- 2日目：GFRC建て込み（写真－2参照）。
- 3日目：シートのジョイント施工（写真－3参照）、支保工の設置（写真－4参照）、およびグラウト注入。
- 4日目：支保工の撤去（写真－5参照）

以上4日間、作業延べ時間は約30時間の短期間で工事を完了した。

4.3 まとめ

本工法を、既存建物の耐震補強工事に初めて適用し、施工を行った結果、以下のことが確認できた。

- (1) GFRCが軽量であるため、特別な重機などを必要としないで、全ての作業を人力で行うことができた。その結果、安全性や作業性に優れていることが確認できた。



図－15 S団地1階平面図



写真－1 GFRC

(2)準備工事なども含めて延べ30時間程度で施工できたことにより、短工期で施工ができることが確認できた。

5. おわりに

GFRC+シートによる補強効果の確認を目的として、実大に近い断面を持つ柱の静的載荷実験を実施した。その結果、シートによる在来工法と変わらない補強効果を有することが確認できた。

また、今回は本工法を適用した建築柱の補強事例を紹介したが、本工法は、GFRCの形状を変えることで、建築物の矩形柱だけではなく、土木構造物の橋脚等にも十分対応できる工法である。補強材料も今回使用した炭素繊維シートだけではなく、必要に応じてアラミド繊維など他の補強材料を使用することも可能である。

このように本工法は作業性、安全性に優れているだけでなく、多種多様な補強工事に対して対応可能であり、今後は本工法の特徴を生かすことで、耐震補強事業へ貢献していきたい。

謝辞

本工法は、(株)新日本製鐵、岡部クリエイト(株)、ゴトウコンクリート(株)、(株)東燃のご協力により開発したものであります。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1)日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度型設計に関する資料
- (2)日本建築防災協会：改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説

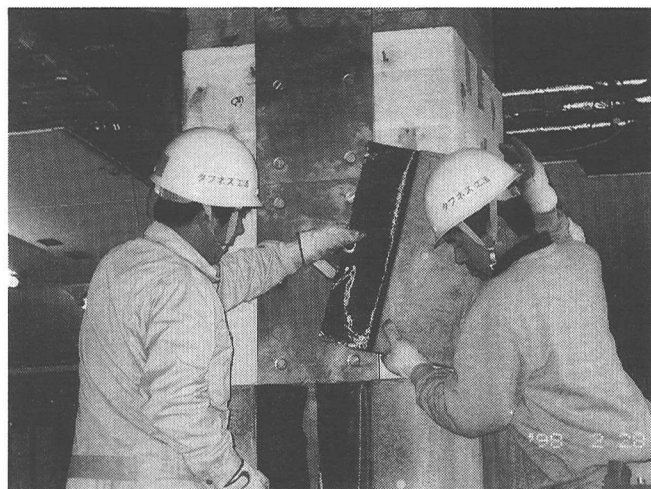


写真-2 GFRCの建て込み

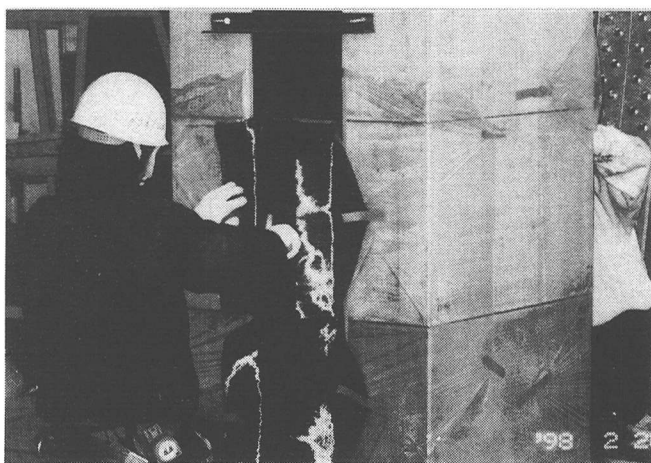


写真-3 シートのジョイント

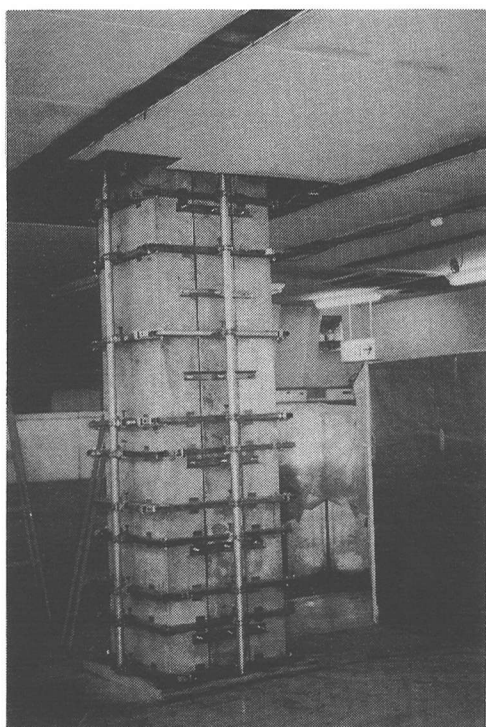


写真-4 支保工の設置



写真-5 支保工の撤去