

(54) CFRP板で補強された耐震壁の挙動に関する解析的研究

萩尾 浩也¹・栗田 康平²・木村 耕三³

¹非会員 株式会社大林組 技術研究所 建築構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail: hagio.hiroya@obayashi.co.jp

²非会員 株式会社大林組 技術研究所 建築構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail: kurita.kohei@obayashi.co.jp

³非会員 株式会社大林組 技術研究所 プロジェクト部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail: kimura.kohzo@obayashi.co.jp

本論文では、CFRP板を耐震壁の壁板に貼り付けて補強した耐震壁の挙動に関する解析的検討について報告する。CFRP板を接着剤で貼り付けて補強する本工法は、低騒音・低粉塵・短工期、かつ機械を用いない工法で、補強後も使用勝手が変化する、または居住空間が狭くなるといった影響がほとんどない。本工法の構造性能を、約1/3に縮尺した耐震壁にCFRP板を貼り付けた実験から補強効果を把握した。実験結果は提案する構成則を用いたFEM解析によって、よく近似していることを確認し、その設計方法を提案した。また、実験結果をシミュレートするモデルを用いてコンクリート強度が変わる場合の挙動を把握し、提案する設計式で開口設置前の設計値まで補強できることを確認した。

Key Words : retrofit, shear wall with opening, CFRP laminate, adhesive, finite element method

1. はじめに

建物の供用期間中には、空調設備更新のため、および改修により窓を設置するため等により、既存耐震壁に開口が必要になる場合がある。耐震壁に開口を設置すると耐力低下が生じるため、その低下分を補強する必要となる。本論文ではその開口設置に伴う耐力低下を、低騒音・低粉塵・短工期で補強が行うことができるCFRP板および接着剤を用いた工法に関する構造性能¹⁾について述べるとともに、その設計方法を提案する。更に実験結果を再現できるFEM解析によって、コンクリート強度が違う場合の挙動を把握し、提案する設計式で開口設置前の設計値まで補強できることを確認した。本工法は新規に開口設置した耐震壁だけではなく、既存の有開口耐震壁の補強にも応用できると考えている。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体は、低層既存建物の耐震壁を模擬し、約1/3スケールに縮尺した。形状・寸法を図-1に示す。パラメータを開口の有無および補強の有無とした結果、試験体数

は、無開口試験体(O_N)、窓開口程度を想定した開口(等価開口周比 $\eta = \sqrt{(h_o/h)} \approx 0.2$)を有する開口試験体(O₂)、およびO₂の壁板の両面にCFRP板を貼付けた補強試験体(O₂-HV)の計3体である。試験体一覧および補強方法を、それぞれ表-1および図-2に示す。なお、有開口耐震壁には、開口補強筋が配置されていない。

(2) 使用材料

補強に用いたCFRP板は、引抜成形による幅50mm、厚さ1.0mmの製品である。CFRP板および耐震壁に使用した鉄筋の機械的性質を表-2に示す。コンクリートの力学的特性は、試験体一覧(表-1)に併せて示す。

(3) 加力方法

実験は図-1に示す通り左右の柱に一定軸力を載荷し、水平方向には1,000kNのオイルジャッキにて片押しの正負繰返し載荷を行った。

(4) 実験結果

荷重と部材角($R = \delta/h$)の関係を破壊状況とともに、図-3に示す。破壊は、写真に示すようにO_Nは典型的なせん断破壊、O₂は開口隅角部から柱へ抜けるせん断破壊、

O2-HVはCFRP剥離後O2と同様な破壊形式となった。約0.2の等価開口周比の開口を設けたO2は、ONと比較して初期剛性の低下、並びにほぼ30%の耐力低下を生じている。その耐力低下した有開口試験体を補強したO2-HVは、開口設置前の初期剛性まで回復できないが、二次剛性が大きくなり、最大耐力は開口設置前とほぼ同等な耐力まで回復できている。その時のCFRP板の最大ひずみは約 $2,000 \times 10^{-6}$ を超える程度であった。

3. FEM解析

(1) モデル

解析は平面応力場を仮定し、壁板部は壁筋を層状置換した四辺形要素、柱は帯筋を層状置換した四辺形要素、および柱主筋を線材置換したトラス要素とするモデルとした。スタブは柱と同様で、主筋は線材置換したトラス要素、せん断補強筋は層状置換した四辺形要素で表現した。補強に使用したCFRP板は層状置換して壁板部に配置した。ただし、CFRP板は実験で得られた最大ひずみ以降は応力を負担しない特性とした。コンクリートのモデル化は文献2),3)に基づき、鉄筋はバイリニアモデルとした。使用プログラムは、コンクリート構造の非線形FEM解析プログラムFINALである。

(2) 実験との比較

最大耐力時の破壊状況および荷重と部材角関係を図-4

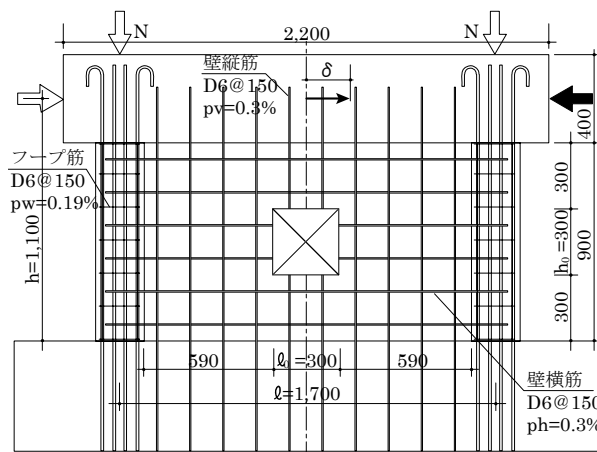


図-1 試験体配筋図および加力図

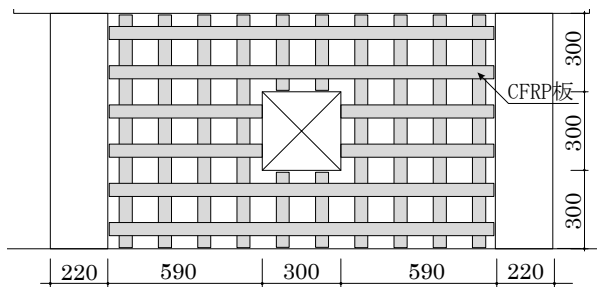


図-2 補強方法

表-2 材料特性

	使用部位	ヤング係数 kN/mm ²	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²
D6	帯筋と壁筋	195	371	472
D13 ^{*1}	柱主筋	186	375	544
D13 ^{*2}		191	359	507
CFRP	補強材	168	—	2,660

*1:ON *2:ON以外

表-1 試験体一覧

名称	ヤング係数 kN/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²	軸力 kN	柱	壁	開口	補強方法
ON	22.1	26.5	2.2	N=145	断面：220×220 主筋：12-D13 (Pg=3.15%) 帯筋：D6@150 (Pw=0.19%)	断面：70×1,480 壁縦筋：D6@150 (Pv=0.30%) 壁横筋：D6@150 (Ph=0.30%)	— 300×300 (η≒0.2)	— 壁全面縦横@150 Pv(CF)=Ph(CF)=0.95%
O2	21.2	22.0	2.0					
O2-HV	21.6	28.1	2.3					

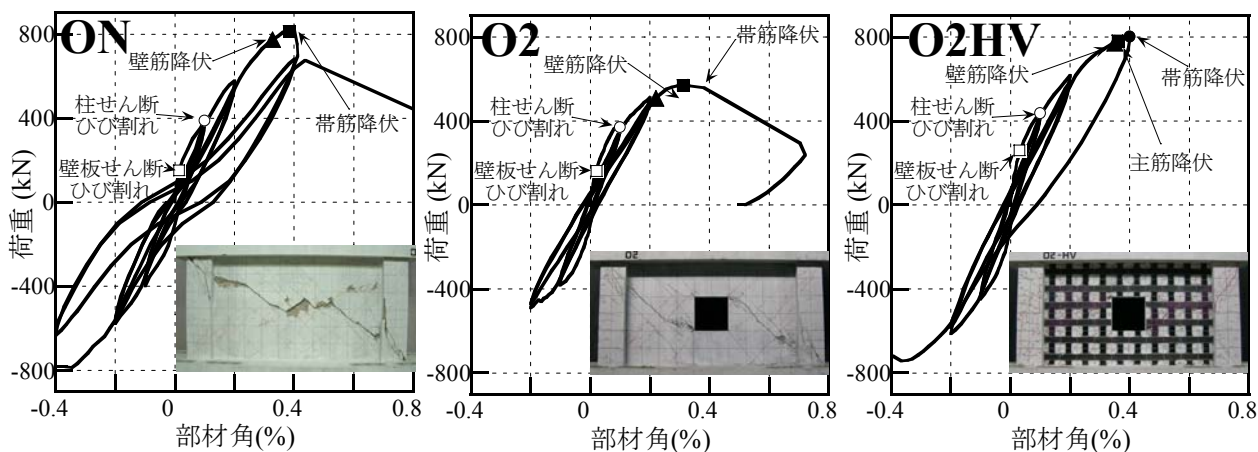


図-3 実験での荷重と部材角関係

に示す。解析の破壊状況図の灰色メッシュは、コンクリートが圧縮軟化域に入ったことを示す。ONの実験値の第二勾配への変化点が解析値よりも小さい部材角となっているが、これは乾燥収縮の影響で壁板に早期にひび割れが発生したためと考えられる。また、解析による最大耐力時の変形が実験値より若干小さいが、解析では繰り返し劣化の影響、および鉄筋とコンクリートは完全付着のため鉄筋の抜出しの影響が考慮されていないためと考えられる。それらを除き総合的には、解析は実験をよく近似していると判断できる。このことから、補強材であるCFRP板は壁筋と同様の効果を果たすことが分かった。

4. 設計式の提案

CFRP板はFEM解析で壁筋として評価が可能であることより、アーチトラス機構⁹⁾のトラス機構に補強効果を考慮することで評価できると考えられる。補強効果は、設計式(1)式の $\Sigma(p_s \cdot \sigma_{sy})$ に算入し、その時のCFRP板の有効強度は実験値で得られた最大ひずみ時の応力度とする。なお、用いた記号は文献4)と同様である。その結果、実

験値に対する設計値の比は、ON、O2、およびO2HVで、それぞれ、1.20、1.23、1.18で、式(1)による設計値は実験値を安全側に評価する結果であった。

$$wQsu = r \left\{ t_w \cdot l_{wb} \cdot \Sigma(p_s \cdot \sigma_{sy}) \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \right\} \quad (1)$$

$$\Sigma(p_s \cdot \sigma_{sy}) = p_{s(s)} \cdot \sigma_{sy(s)} + p_{s(cf)} \cdot \sigma_{sy(cf)}$$

$p_{s(s)}$: 既存壁板の壁筋比

$p_{s(cf)}$: CFRP板の補強筋比

$\sigma_{sy(s)}$: 壁筋の降伏点(N/mm²)

$\sigma_{sy(cf)}$: CFRP板の有効強度(N/mm²)

ただし、 $\sigma_{sy(cf)} = E_{cf} \cdot \varepsilon_{cf}$ とする。

E_{cf} : CFRP板のヤング係数

$\varepsilon_{cf} : 2000 \times 10^{-6}$

5. 数値シミュレーション

(1) 数値実験

本実験結果はFEM解析でほぼ再現できることが分かつ

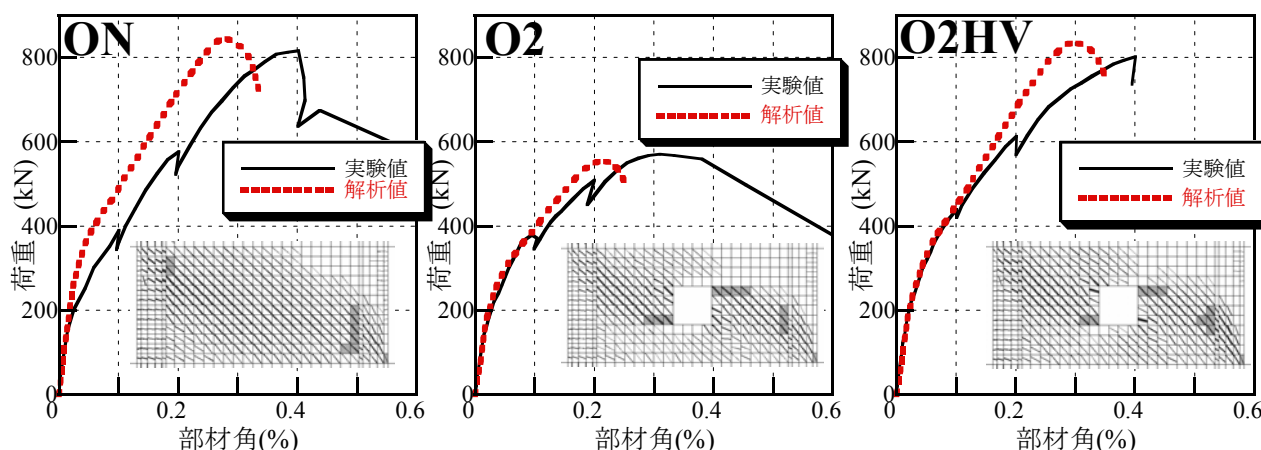


図4 実験および解析による荷重と部材角の関係

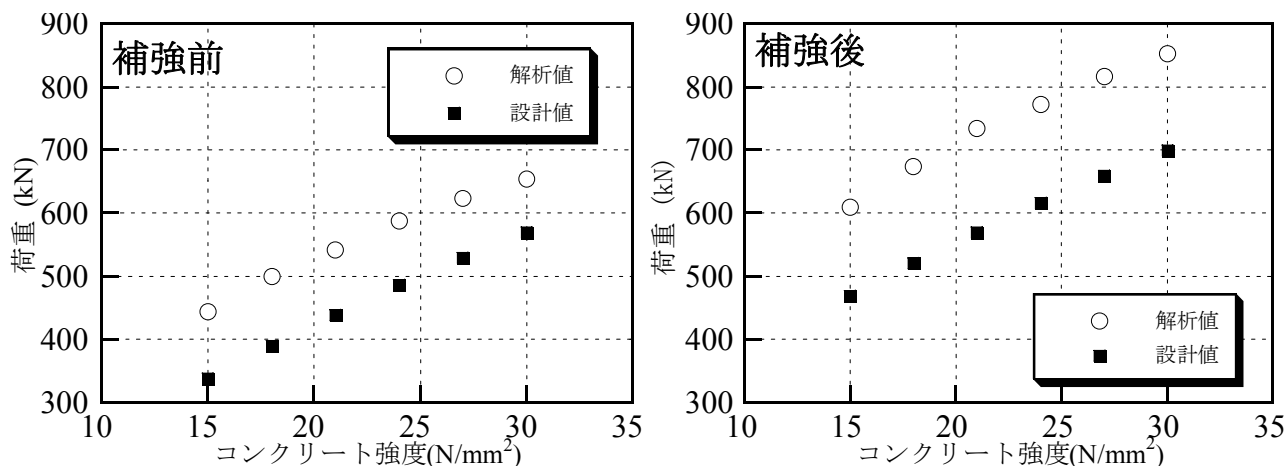


図5 コンクリート強度が変化する場合の最大耐力と設計値の関係

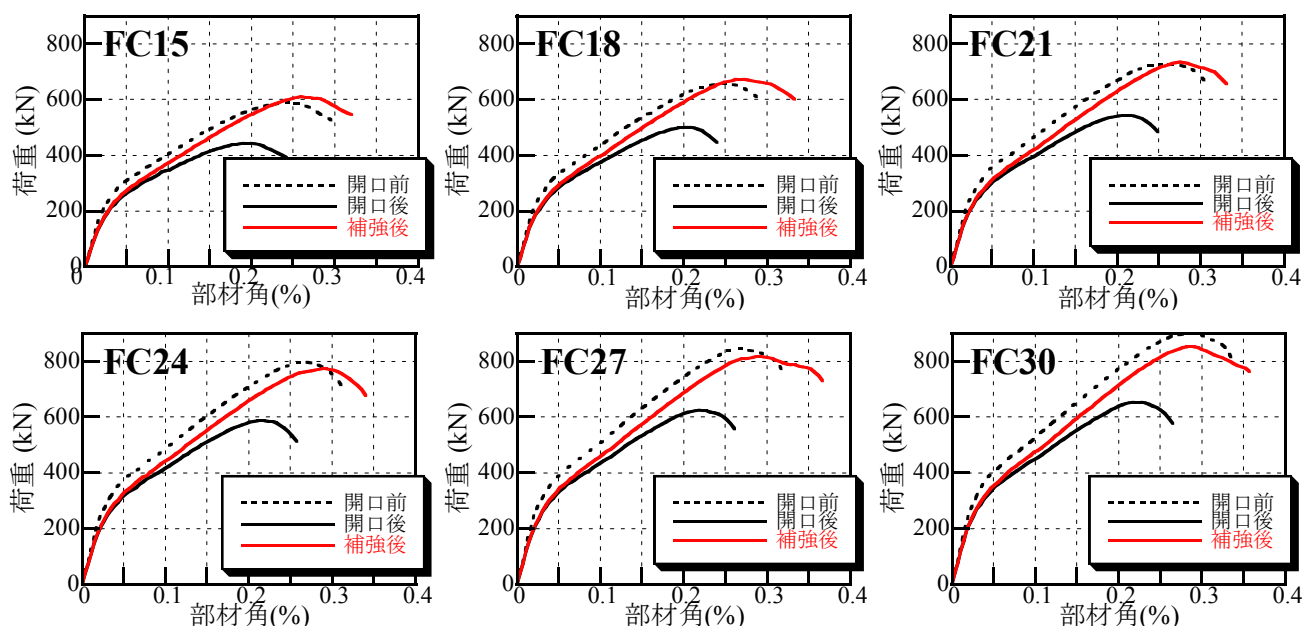


図-6 各コンクリート強度にける開口設置前と開口設置後および補強後の部材角とせん断力の関係

たので、コンクリート強度が異なる場合のパラメータスタディーを行った。パラメータであるコンクリート強度は、圧縮強度15 N/mm²から30 N/mm²まで、3 N/mm²ピッチで六種類とした。

(2) 数値実験結果

数値実験の結果、すべて解析ケースの破壊は、破壊状況等からすべてせん断破壊と判断した。補強前および補強後で各コンクリート強度における最大耐力および設計値を比較した図を図-5に示す。これらの結果から、提案する設計式は、安全側に評価できることが分かる。また、図-6に開口設置前、開口設置後、および実験と同量の補強後の部材角と荷重の関係を示す。この図より、コンクリート強度が24N/mm²以上の場合には、僅かながら開口設置前の最大耐力まで達さないことが分かった。

6. おわりに

CFRP板で補強された有開口耐震壁のせん断耐力は、本提案式で安全側に評価できることが分かった。

参考文献

- 1) 萩尾浩也他：既存耐震壁の新規開口補強に関する研究（その2 小さい開口を有する耐震壁）、日本建築学会大会梗概集 2007.8、pp.459-460
- 2) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp.163-170、1995.8
- 3) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その1）、日本建築学会構造系論文報告集、第421号、pp.39-48、1991.3
- 4) 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、1998.

ANALYTICAL STUDY ON BEHAVIOR OF SHEAR WALLS RETROFITTED BY CFRP LAMINATE

Hiroya HAGIO, Kohei KURITA and kohzo KIMURA

This paper describes structural performance and a design method of shear walls with opening that are strengthened with carbon fiber reinforced plastic laminate and adhesive against an earthquake load. A loading test shows that shear strength of shear walls with opening can be improved by bonding CFRP laminate to wall. The experimental results of relationships of shear force and displacement are simulated by FEM analysis by replacing CFRP laminate to wall bar. An equation for calculating the shear strength is proposed using a macroscopic model based on the concept of the arch and the truss mechanism adding strengthening effect.