

論文 CFRP 板を用いた既存耐震壁の新規開口補強に関する研究

萩尾 浩也^{*1}・木村 耕三^{*2}・勝俣 英雄^{*3}

要旨：既存の無開口耐震壁に開口を設置して耐力低下した有開口耐震壁に、CFRP 板を壁版に貼り付けて簡単に補強できる工法を検討した。無開口耐震壁，開口補強筋がない有開口耐震壁，および CFRP 板補強を行った開口耐震壁の実験を行い，開口補強筋を新たに設置せずとも壁版のみに接着剤で CFRP 板を貼付けることにより，補強効果があることが分かった。実験結果は FEM 解析で評価することが可能であり，本工法で補強された耐震壁のせん断耐力は，提案する設計式で安全側の評価が得られた。

キーワード：耐震補強，CFRP 板，有開口耐震壁，接着，FEM 解析

1. はじめに

建物の長寿命化，ライフスタイルの変化への対応として，住戸の二戸一化等が実施されている。隣接する住戸の二戸一化には，既存耐震壁に開口を設置するため，耐力が低下する。よって，その低下分の耐力をどこかで補わなければならない。その回復方法のひとつとして，従来工法である壁の増厚工法があるが，コンクリート打設をするため，工事が大掛かりになる傾向がある。著者らは，コンクリート打設を行わずに CFRP シートを貼り付けることにより，低下する耐力を回復できることを報告している¹⁾。本論文では更に簡単な方法である炭素繊維強化プラスチック板（以下，CFRP 板）を接着剤で壁版のみに貼り付けて補強した開口耐震壁の構造性

能について述べる。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は，低層既存建物の耐震壁を模擬（約 1/3 スケール）したもので，形状・寸法を図-1 に示す。試験体は補強方法をパラメータとし，補強方法の概要および一覧を，それぞれ図-2~4 および表-1 に示す。試験体は，無開口試験体 (ON)，片開きドア開口を想定した開口(等価開口周比 $\sqrt{(h_0l_0/hl)} \approx 0.3$)を有する開口試験体(O3)，および開口試験体の壁板を CFRP 板で補強した試験体(O3-H, O3-HV, O3-Ha)の合計 5 体である。CFRP 板の貼付けは，粘性の高い接着剤で接着した。O3-H および O3-HV は CFRP 板を接着した

表-1 試験体一覧

名称	Fc N/mm ²	E _c kN/mm ²	σ _B N/mm ²	柱	壁	開口	補強方法
ON	21	22.1	26.5	断面：220×220 主筋：12-D13 (P _g =3.15%) 帯筋：D6@150 (P _w =0.19%) 軸方向応力度 σ ₀ =3.0N/mm ²	断面：70×1,480 壁縦筋：D6@150 (P _v =0.30%) 壁横筋：D6@150 (P _h =0.30%)	—	なし
O3		22.5	25.9			なし	
O3-H		22.6	26.2			壁全面横@150 p _v (cf)=0、p _h (cf)=0.95%	
O3-HV		21.8	26.7			壁全面縦横@150 p _v (cf)=p _h (cf)=0.95%	
O3-Ha		22.7	24.7			壁全面横@150、アンカー p _v (cf)=0、p _h (cf)=0.95%	

*1 大林組 技術研究所 プロジェクト部 主査 工修 (正会員)

*2 大林組 技術研究所 プロジェクト部 専任役 工博 (正会員)

*3 大林組 技術研究所 建築振動制御研究室 室長 工修 (正会員)

のみであるが、O3-Ha は図-4 に示すように CFRP 板の端部を鉄板とボルトで固定した。補強筋比は、壁筋比と同様に壁板単位断面面積あたりの補強断面積で示す。なお、開口試験体 (O3) および CFRP 板で補強した試験体 (O3-H, O3-Ha, O3-HV) には開口補強筋はなく、切断された壁筋にもフック等による定着は施していない。

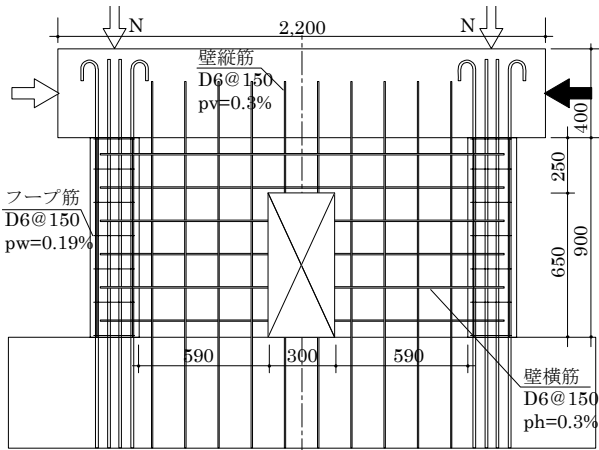


図-1 試験体形状および配筋図

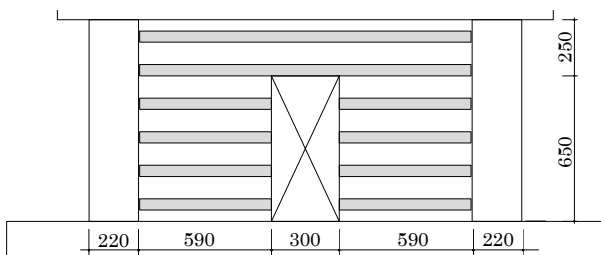


図-2 O3-H の補強方法

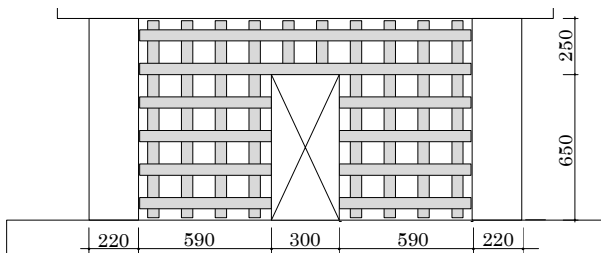


図-3 O3-HV の補強方法

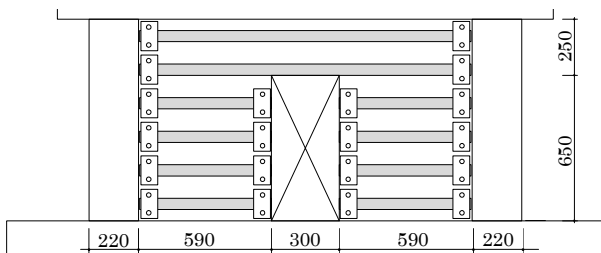


図-4 O3-Ha の補強方法

2.2 材料

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。

表-2 材料の機械的特性

	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
M16	定着ボルト	174	702	916
CFRP ^{*3}	補強材	176	—	2,863
CFRP ^{*4}	補強材	168	—	2,659

^{*1}: ON, O3, O3-Ha

^{*2}: O3-H, O3-HV

^{*3}: O3-Ha

^{*4}: O3-H, O3-HV

2.3 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 of 正負繰返し載荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-5~9 に荷重と部材角の関係を示す。図中の□印 CRw, ○印 CRc, ▲印 Ybw, ■印 Ybh, および●印 Ybc は、それぞれ壁板のせん断ひびわれ、柱のせん断ひびわれ、壁横筋の降伏、帯筋の降伏および柱主筋の降伏を示す。また図-10 に包絡線の比較を示す。

無開口耐震壁に約 0.3 の等価開口周比の開口を設けることで、初期剛性の低下およびほぼ 30% の耐力低下を生じている。その低下した有開口試験体を補強することによって、初期剛性は回復できないものの、二次剛性が少し大きくなっていることが分かる。水平方向にのみ CFRP 板を貼り付けた O3-H とその CFRP 板を定着した O3-Ha では、O3-H で CFRP 板の剥離が生じるまで性状の差はほとんどない。O3-H は早期に剥離が生じたために補強効果が少ないが、定着した O3-Ha および鉛直方向にも CFRP 板を貼り付けた O3-HV では補強効果が確認された。ON, O3, O3-H, O3-HV, および O3-Ha の最大耐力は、そ

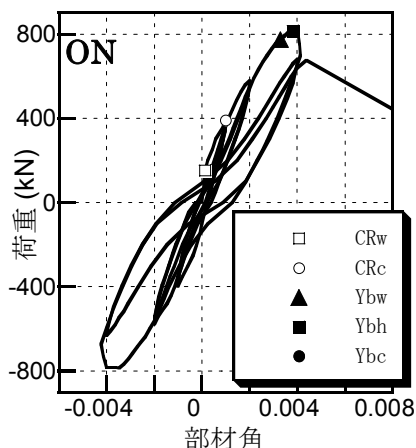


図-5 ONのQ-R関係

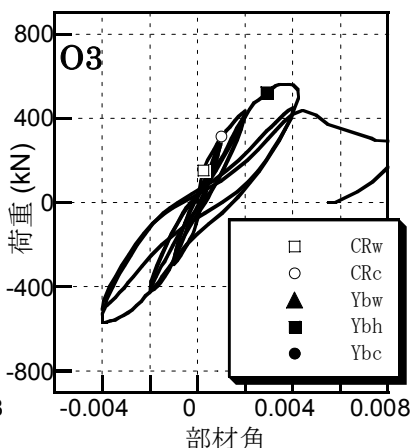


図-6 O3のQ-R関係

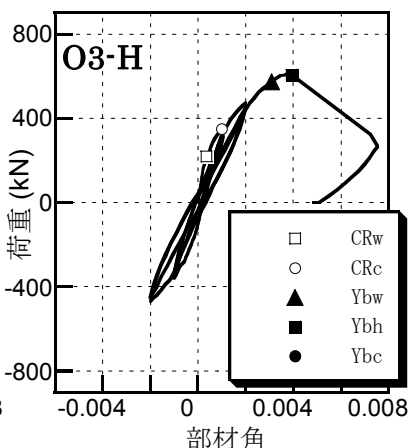


図-7 O3-HのQ-R関係

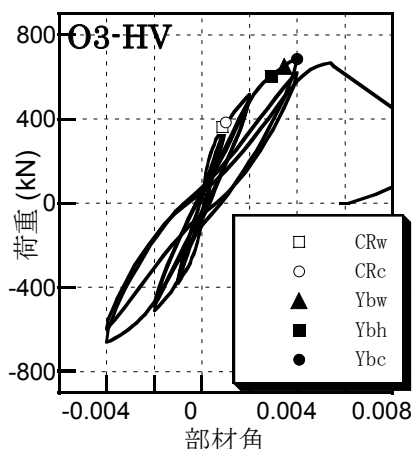


図-8 O3-HVのQ-R関係

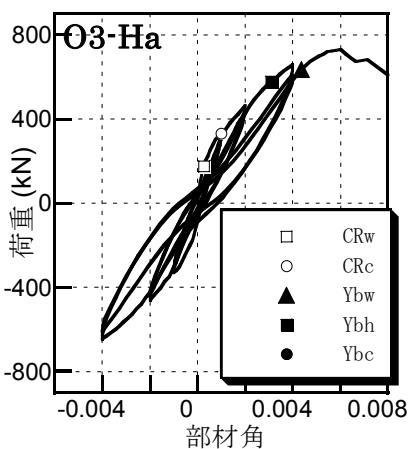


図-9 O3-HaのQ-R関係

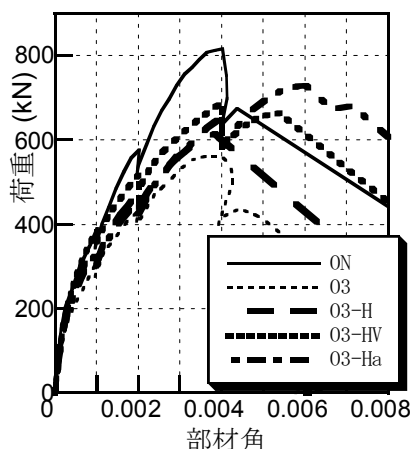


図-10 包絡線比較

れぞれ、816kN、561kN、614kN、686kN、および729kNであった。無補強試験体O3に対するO3-H、O3-HV、およびO3-Haの補強効果は、それぞれ10%、22%、および30%であった。無開口試験体ONに対するO3-H、O3-HV、およびO3-Haの回復効果は、それぞれ75%、84%、および90%であった。

最終破壊は、無開口耐震壁ONの場合、典型的なせん断破壊を呈し、無補強開口耐震壁O3の場合も、開口耐震壁の破壊でよく見られる開口横でのせん断破壊であった。補強されたO3HおよびO3-HVの最終破壊は、CFRP板の剥離によって生じ、無補強試験体O3とほぼ同様な破壊形式であったが、O3-Haは開口横の壁板で破壊せず開口上部で水平にスリップする破壊がCFRP板の剥離より先行する形式で生じた。各試験体の破壊状況を写真1~5に示す。

CFRP板の最大ひずみは、O3-H、O3-HVおよ

びO3-Haで、それぞれ、約 $1,000 \times 10^{-6}$ 、約 $2,000 \times 10^{-6}$ 、および約 $3,000 \times 10^{-6}$ であった。測定位置は開口横の壁板のほぼ中央位置である。

3.2 ひびわれ幅

壁板にはクリップゲージを取り付け、ひびわ

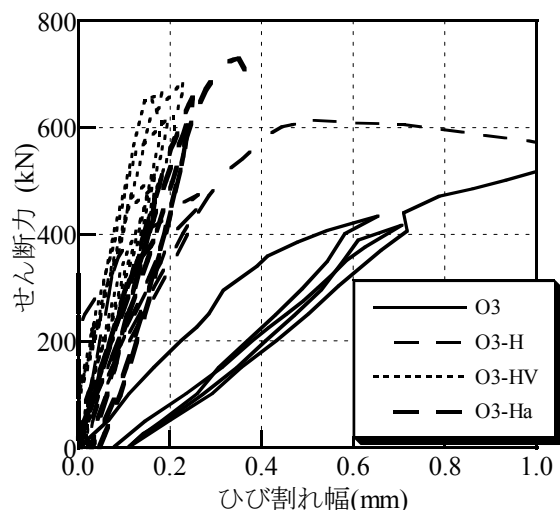


図-11 ひびわれ幅の比較

れ幅を計測した。測定位置は開口横の壁板のほぼ中央位置である。その結果を図-11に示す。CFRP板を水平に貼り付けたO3Hは、途中からひびわれが開くことを抑える効果が薄れてきている傾向が認められる。一方O3-HVとO3Haは最大耐力まで、ひびわれが大きく広がるのを拘束していた。

4. 数値シミュレーション (FEM)

4.1 使用モデル

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、柱主筋は線材置換したトラス要素で表現した。スタブは、壁板部と同様に主筋およびせん断補強筋を層状置換した四辺形要素で表現した。補強に使用したCFRP板は線材置換したトラス要素として配置した。ただし、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。コンクリートの材料構成のモデル化は文献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FINALである。

4.2 無補強試験体の解析

(1) 無開口無補強試験体 ON の解析

ONの実験と解析の比較を、最終破壊直後の状況および解析の最大荷重時の破壊状況を、それぞれ写真-1および図-12に示す。解析の破壊



写真-1 ONの破壊状況

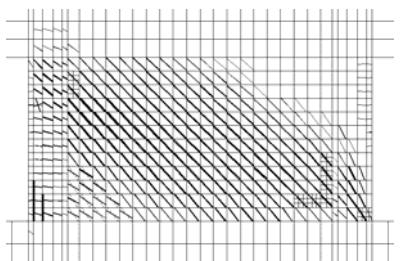


図-12 ONのひび割れ図



写真-2 O3の破壊状況

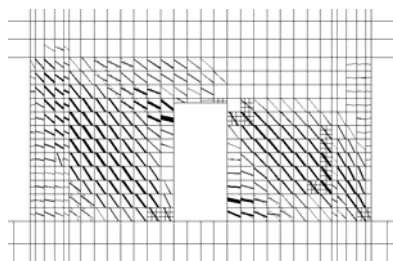


図-13 O3のひび割れ図

状況は、実験の破壊状況に近いことが分かる。また解析および実験の荷重と部材角関係を示した図-14より、最大耐力はよく近似できているが、解析による剛性は若干実験値より大きい。その主因は、解析モデルでは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。これらのことより、解析結果は実験結果とほぼ対応していると考えられる。

(2) 有開口無補強試験体 O3 の解析

有開口耐震壁の解析結果も、実験の破壊状況(写真-2)と解析による破壊状況の比較(図-13)、ならびに図-14の荷重と部材角関係の比較により、解析結果と実験結果は対応している。

4.3 補強試験体の解析

(1) 有開口補強試験体 O3-H の解析

図-18に示す荷重と部材角関係、および写真-3(実験の破壊状況)、図-15(解析によるひびわれ図)より、O3-Hの解析結果は実験値と近似している。

(2) 有開口補強試験体 O3-HV の解析

図-19に示す荷重と部材角関係、および写真-4(実験の破壊状況)、解析によるひびわれ図(図-16)の比較から、O3-HVの解析結果は実験結果を比較、若干低く評価している。これは3.2節のひびわれ幅で述べたように、本来ひびわれ面をまたぐ圧縮強度は低下するが、CFRP板の

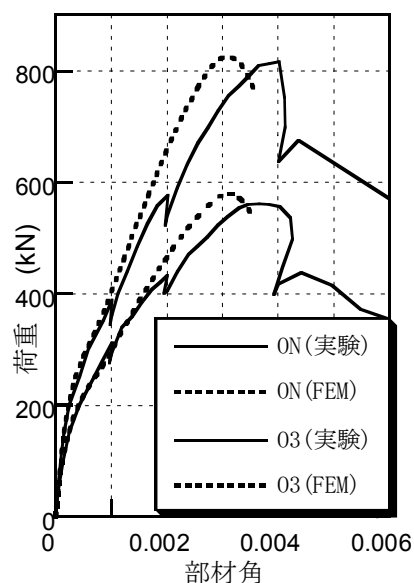


図-14 実験と解析比較



写真-3 03-Hの破壊状況

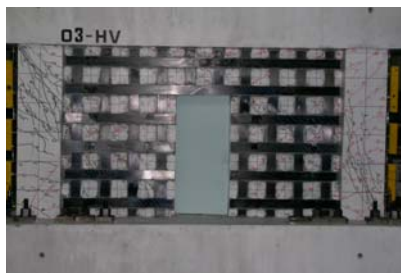


写真-4 03-HVの破壊状況



写真-5 03-Haの破壊状況

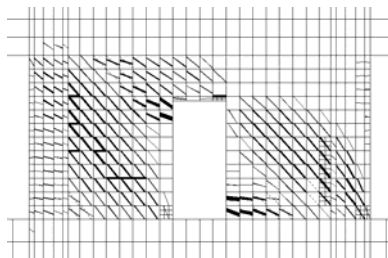


図-15 03-Hのひび割れ図

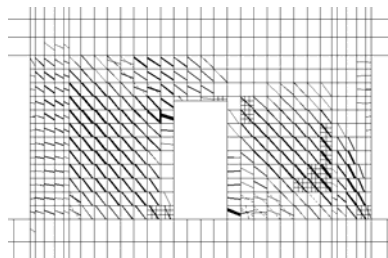


図-16 03-HVのひび割れ図

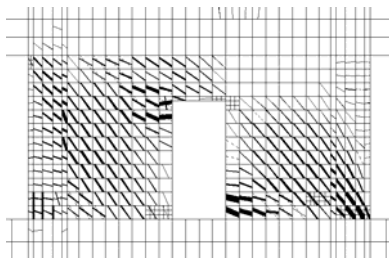


図-17 03-Haのひび割れ図

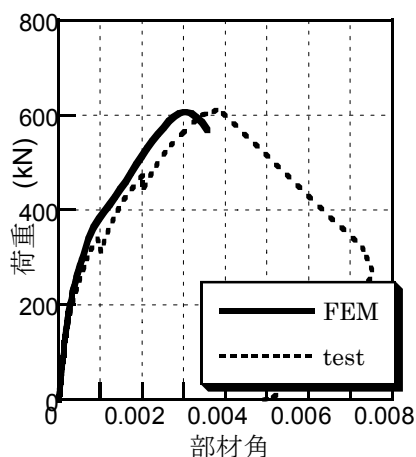


図-18 03-H実験と解析比較

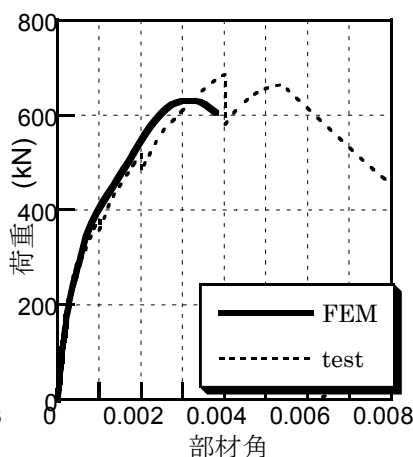


図-19 03-HV実験と解析比較

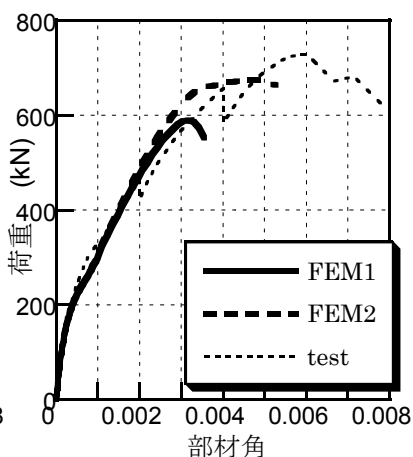


図-20 03-Ha実験と解析比較

補強によりひびわれ幅が大きく広がるのを拘束しているため、想定する低下率より少ない可能性を示唆している。

(3) 有開口補強試験体 03-Ha の解析

03-Ha の実験値と解析値の比較を、図-20 に示す荷重と部材角関係、および実験の破壊状況である写真-5 と解析のひびわれ図である図-17で行った。なお、解析の破壊状況である図-17は後述の FEM2 の解析結果である。本試験体の解析は二種類行った。FEM1 は CFRP 板を単純なトラス置換で解析をしたもので、FEM2 は FEM1 に加えてコンクリートの有効圧縮強度の低減を考慮しないで解析をしたものである。この解析 FEM2 は、開口横の壁板部で破壊しなかつた

実験結果を考慮して、壁板部の有効圧縮強度が改善されたという仮定を検証するためである。その結果、03-Ha は単純に補強効果をトラス筋で評価するだけはかなり安全側の評価となり、有効圧縮強度の低減を考慮しないことによって実験値にかなり近づく評価となった。それでも解析値が実験値よりまだ若干低いのは、CFRP 板端部の定着板の影響と考えられる。

5. 設計式の検討

4 章の解析で補強効果は壁筋としてモデル化することによって安全側に評価できることが示されているので、アーチトラス機構⁴⁾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

えた。その設計式を式 (1) に示す。用いた記号は文献 4)と同じものを使用している。

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

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

$p_{s(s)}$: 既存壁板の壁筋比
 $p_{s(cf)}$: 壁筋の降伏点(N/mm²)
 $\sigma_{sy(s)}$: CFRP 板の補強筋比
 $\sigma_{sy(cf)}$: CFRP 板の有効強度(N/mm²)

で、 $\sigma_{sy(cf)} = E_{cf} \varepsilon_{cf}$ とする。
 E_{cf} : CFRP 板のヤング係数
 横張り : $\varepsilon_{cf} = 1000 \times 10^{-6}$
 縦横張り : $\varepsilon_{cf} = 2000 \times 10^{-6}$
 横張り定着 : $\varepsilon_{cf} = 3000 \times 10^{-6}$

計算結果を図-21 に示す。この結果より、実験は式(1)で安全側の評価となる。ただし、定着を行った O3-Ha 場合のようにひびわれ幅の拡大を拘束することによる有効強度の改善効果に関しては今度の検討課題である。

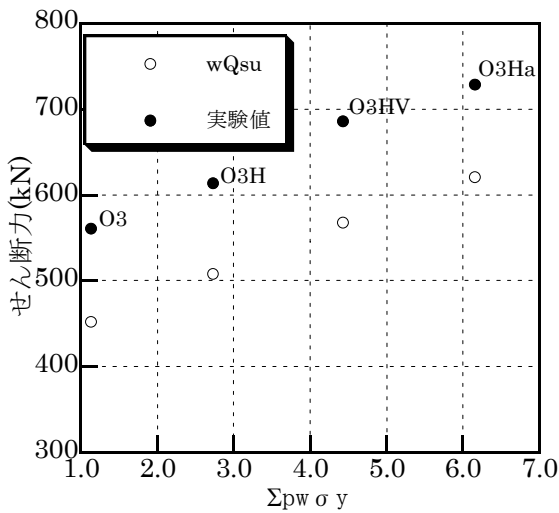


図-21 計算結果と実験値の比較

6. まとめ

既存耐震壁に開口を設ける場合の補強方法として、CFRP 板による補強効果の確認実験を行い、以下のことが分かった。

- (1) 開口によって生じる耐力低下は、開口補強筋を配置せずとも CFRP 板を貼り付けることによって回復することが出来るが、十分な剛性の回復は期待できない。
- (2) 無補強無開口試験体 ON および無補強有開口試験体 O3 は、提案するモデルを用いた FEM で実験結果を近似できる。
- (3) 補強され定着されていない試験体は、CFRP 板を壁筋置換して、FEM で実験結果をほぼ近似できる。定着した場合は、更にひびわれの広がり抑制効果を考慮の方がより実験結果を近似する。
- (4) 本工法で補強を行った開口耐震壁の耐力は、提案する設計式で安全側に評価することが出来る。ただし、ひびわれ幅の拡大を拘束する補強をした場合の有効圧縮強度が改善される効果に関しては今度の検討課題である。

謝辞

本試験体の製作にあたり、旭硝子マテックス(株)糸日谷剛氏、日本シーカ(株)石田良平氏および戸上郁英氏の協力を得ました。紙面を借りて深謝いたします。

参考文献

- 1) 木村 耕三, 萩尾 浩也, 勝俣 英雄 : 既存耐震壁の新規開口補強に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 分冊, pp.633-634, 2003.9
- 2) 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
- 3) 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
- 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.