論文　CFRP 板を用いた既存無開口耐震壁の補強に関する研究

萩尾　浩也[*1]・栗田　康平[*2]・木村　耕三[*3]・勝俣　英雄[*4]

要旨：既存の無開口耐震壁に CFRP 板を接着剤で貼り付けて簡単に短工期で補強できる工法を検討した。CFRP 板の補強量，および壁板の両面または片面から補強という補強方法を変化させて，CFRP 板で補強し無開口耐震壁の実験を行った。その結果，補強量が多いほど補強効果があること，および片面からのみの補強でも補強量に応じた補強効果があることが分かった。その実験結果は 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ることが分かった。

キーワード：耐震補強，CFRP 板，無開口耐震壁，接着，FEM 解析

1. はじめに

国土交通省の報告[1)]によると，既存建築物の耐震性能が確保されているものは，民間建築物で約 4%，公共建築物で約 27%とされており，耐震補強が必要な建築物が多々ある現状が分かる。そこで耐震補強の普及を計るには，建物を使用しながら短工期で施工でき，空間的利便性を損なわないような耐震補強が効果的と考えられる。従来工法である耐震壁の補強方法のひとつとして，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り，有効な床面積も減少する。著者らは，居住空間にほとんど影響を与えず，かつコンクリート打設を行わずに簡単に施工できる炭素繊維強化プラスチック板（以下，CFRP 板）を有開口耐震壁に貼り付けて補強を行う工法の報告[2)]をしている。本論文では，CFRP 板で補強した無開口耐震壁の構造性能について報告する。

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 CFRP 板による補強量，および補強方法（両面補強または片面補強）をパラメータとした。補強方法の一覧および概要を，それぞれ**表－1** および**図－3～5** に示す。試験体は，比較対象のための無補強試験体(UnR)，両面から補強した試験体(BHVa)，片面のみを補強した試験体(S1HVa)，および S1HVa 試験体の 1.25 倍の

表－1　試験体一覧

名称	E_C kN/mm^2	σ_B N/mm^2	柱	壁	補強方法
UnR	17.9	16.3	断面：220×220 主筋：12－D13 (Pg＝3.15%) 帯筋：D6@150 (Pw＝0.19%) 軸方向応力度 σ0＝3.0N/mm^2	断面：70×1,480 壁縦筋：D6@150 (Pv＝0.30%) 壁横筋：D6@150 (Ph＝0.30%)	－
BHVa	18.4	19.5			壁両面縦横@200 pv(cf)=0.71、ph(cf)=0.71%
S1HVa	18.6	17.7			壁片面縦横@200 pv(cf)=0.36、ph(cf)=0.36%
S2HVa	18.1	19.3			壁片面縦横@150 pv(cf)=0.48、ph(cf)=0.48%

*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　建築構造研究室　副主査　工修　(正会員)
*3 大林組　技術研究所　プロジェクト部　専門副主事　工博　(正会員)
*4 大林組　技術研究所　建築振動制御研究室　室長　工修　(正会員)

補強量を片面のみで補強した試験体(S2HVa)の合計 4 体である。CFRP 板の貼付けは，粘性の高いエポキシ樹脂系の接着剤で接着した。補強したすべて試験体の CFRP 板の端部は，**図－2** に示すアングルとボルトで壁板に定着した。補強筋比は，壁筋比と同様に壁板単位断面積あたりの補強断面積で示す。

2.2 使用材料

補強に用いた CFRP 板は，引抜形成による幅 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。

2.3 加力方法

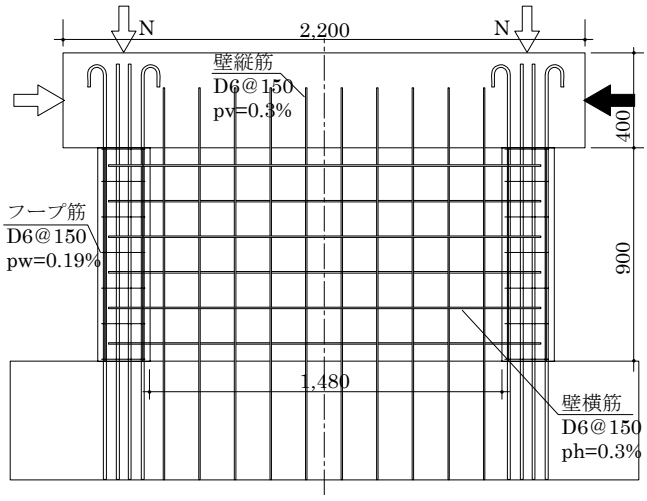
実験は**図－1** に示す通り左右の柱にそれぞれ一定軸力（N=145kN）を載荷し，水平方向には 1,000kN のオイルジャッキにて片押しの正負繰返し載荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図－6～9 に荷重と部材角の関係を示す。図中および**表－3** の□印 CRw, ○印 CRc, ▲印 YBw, および■印 YBh は，それぞれ壁板のせん断ひび割れ，柱のせん断ひび割れ，壁横筋の降伏，および帯筋の降伏を示す。**表－3** に，各試験体の諸荷重一覧を示す。なお，主筋の降伏は観察されなかった。**図－7～9** には，無補強試験体の包絡線を点線で示す。各試験体の破壊状況を**写真 1～4** に示す。

無開口耐震壁を CFRP 板で補強することにより，初期剛性は変化しないが，壁面のせん断ひび割れ後の二次剛性が大きくなっていることが分かる。また，UnR, BHVa, S1HVa, および S2HVa の最大耐力は，**表－3** に示す通り，補強量が多いほど耐力が高くなっている。最終破壊は，無補強試験体も補強試験体も，典型的なせん断破壊を呈した。CFRP 板は最大耐力以前に部分的な剥離はしたが，定着してあるためその後もひずみが増大し，最終まで CFRP 板が破断することはなかった。無補強試験体 UnR に対する BHVa, S1HVa，および S2HVa の最大耐力の比は，それ

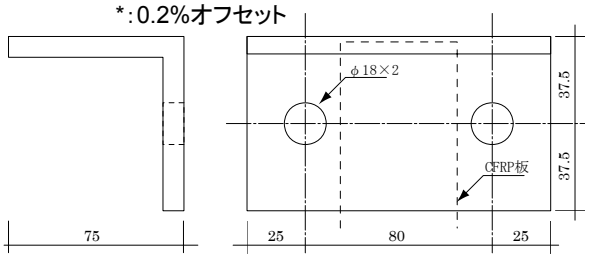


図－1　試験体形状および配筋図

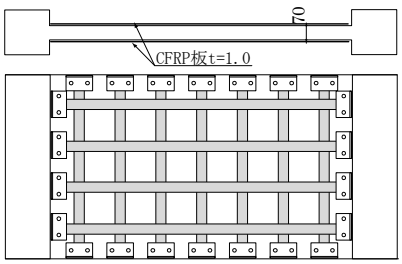
表－2　材料の機械的特性

	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	柱主筋	192	374	507
M12	定着ボルト	222	643*	707
CFRP	補強材	168	—	2,660

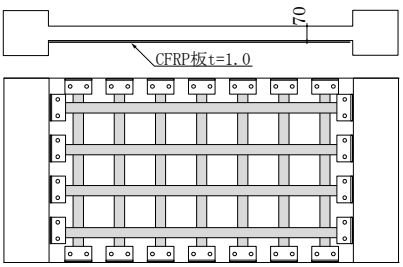
*：0.2%オフセット



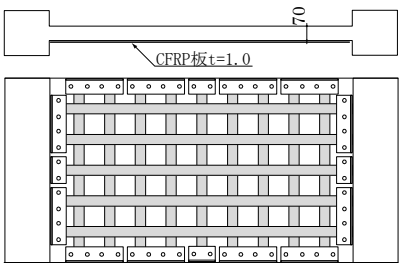
図－2　定着板の詳細図



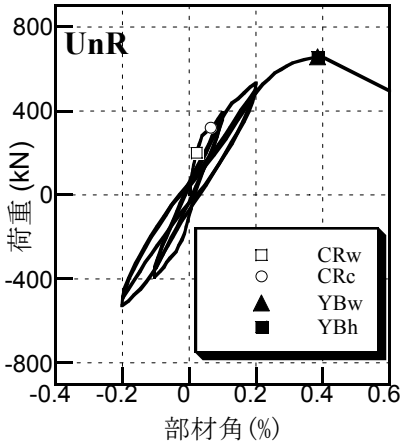
図－3　BHVa の補強方法



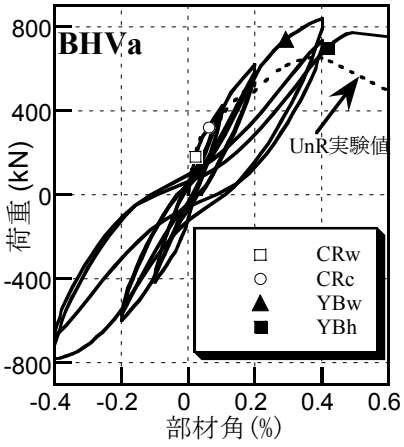
図－4　S1HVa の補強方法



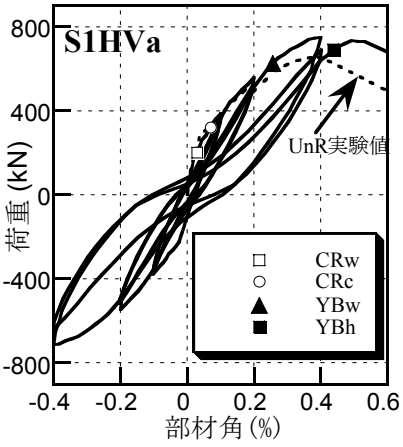
図－5　S2HVa の補強方法



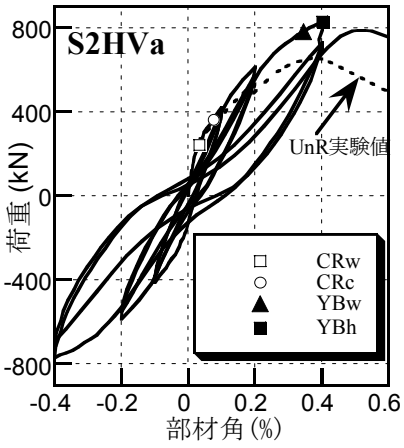
図－6　UnR の Q-R 関係



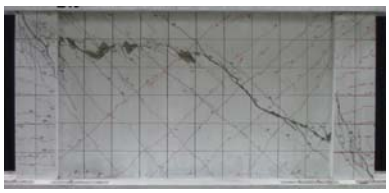
図－7　BHVa の Q-R 関係



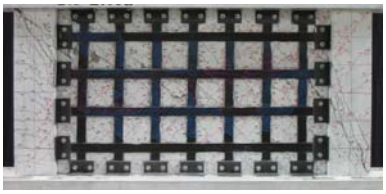
図－8　S1HVa の Q-R 関係



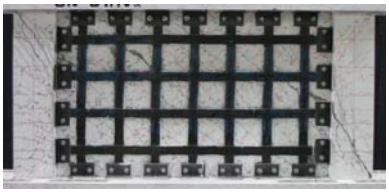
図－9　S2HVa の Q-R 関係



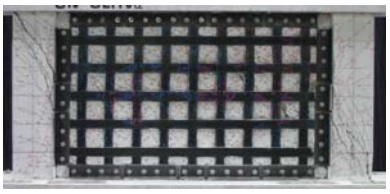
写真－1　UnR の最終状況



写真－2　BHVa の最終状況



写真－3　S1HVa の最終状況



写真－4　S2HVa の最終状況

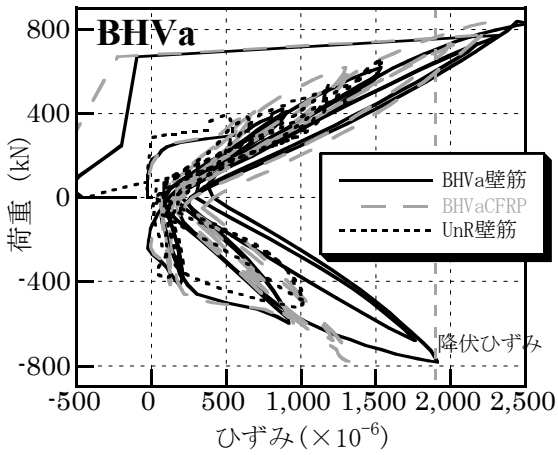
ぞれ 128%，114%，および 126%であった。

3.2 壁筋および CFRP 板のひずみ

代表例として，補強した試験体 BHVa の壁板のほぼ中央の壁筋のひずみおよびほぼ同位置にある CFRP 板のひずみと荷重の関係を**図－10** に示す。図中の点線は同位置の無補強試験体の壁筋のひずみである。**図－10** より CFRP 板のひずみはほぼ同位置の壁筋ひずみと同様な性状を示し，補強材である CFRP 板は，壁筋と同様な働きをしていると判断できる。更に壁筋は降伏ひずみを超えても，急激にひずみが進行することがないことが観察されている。その理由として，周囲から CFRP 板がひび割れを広がろうとするのを拘束するために壁筋が降伏しても急激なひずみの進行を抑制する効果があったと推測している。CFRP 板の最大ひずみはすべての補強試験体も同様で約 $2{,}000\times10^{-6}$ を超える程度であった。なお，他の補強試験体も同様の性状を示した。

表－3　各試験体の諸荷重一覧

	最大耐力 (kN)	壁板のせん断ひび割れ □(kN)	柱のせん断ひび割れ ○(kN)	壁筋の降伏 ▲(kN)	帯筋の降伏 ■(kN)
UnR	655	200	320	654	654
BHVa	836	180	320	738	698
S1HVa	749	200	320	623	690
S2HVa	826	240	360	780	826

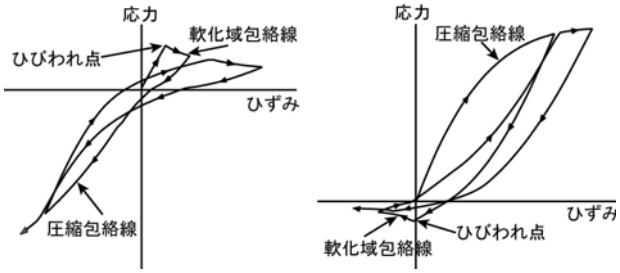


図－10　BHVa の壁筋と CFRP 板のひずみ

4. 数値シミュレーション（FEM）

4.1 使用モデル

解析は単調載荷および繰返し載荷の二種類行った。単調載荷の解析は CFRP 板を除いて文献 2)と同様なモデルを使用した。つまり，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 板は層状置換して壁板部に配置した。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。単調載荷のコンクリートのモデル化は文献 3),4)に基づき，鉄筋はバイリニアモデルとした。繰返し載荷解析のコンクリートの材料構成則は文献 5)に基づき**図－11** に示すモデルとし，鉄筋は除荷・再載荷剛性を弾性剛性とするバイリニアモデルとした。使用プログラムは FINAL である。荷重と部材角を示す**図－12～15** の黒色実線，灰色実践および点線は，それぞれ繰返し載荷の解析，単調載荷の解析，および実験値を示す。実験結果および解析結果の最大耐力の一覧を**表－4** に示す。



a）ひび割れ後に圧縮側に移行　　b）圧縮側から除荷後にひび割れ発生

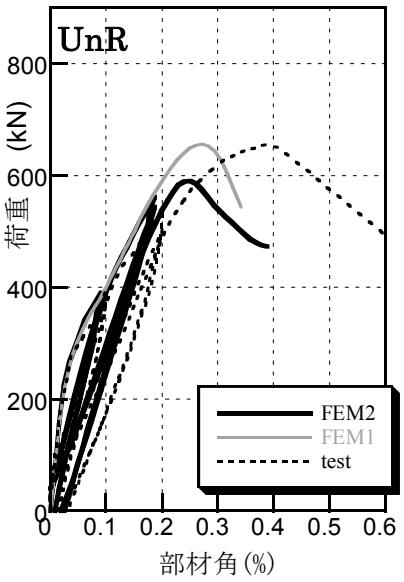
図－11　繰返し応力下での履歴特性

4.2 無補強試験体の解析

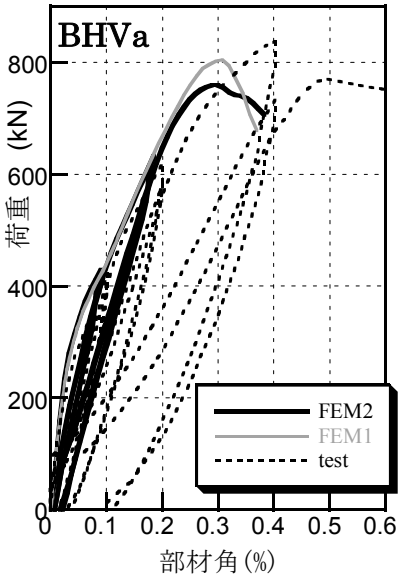
無補強試験体 UnR の実験結果と解析結果の比較を，繰返し載荷解析の最大耐力の破壊状況を，それぞれ**図－12** および**図－16** に示す。解析の破壊状況の灰色のメッシュは，コンクリートの応力とひずみ関係で最大強度を超えた領域（以下，圧縮軟化域と呼称）に入ったことを示す。解析および実験の荷重と部材角関係を示した**図－12** より，単調載荷解析の場合最大耐力および剛性はよく近似できているが，最大耐力時の変形が実験値より小さい。その原因は，単調載荷解析モデルでは繰り返し劣化の影響，および鉄筋とコンクリートは完全付着のため鉄筋の抜出しの影響が考慮されていないためと考えられる。一方，繰返し載荷解析の場合，剛性は良く近似しているが，最大耐力時の変形が実験値より小さい。また今回の実験の場合，今回使用した解析モデルでは部材角 2/1000 時の繰り返しによる劣化が実験値より僅かながら大きく，その分最大耐力を若干低く評価しているが，その比率は一割程度であり，今回の解析モデルで実験値を近似していると考えている。

4.3 補強試験体の解析

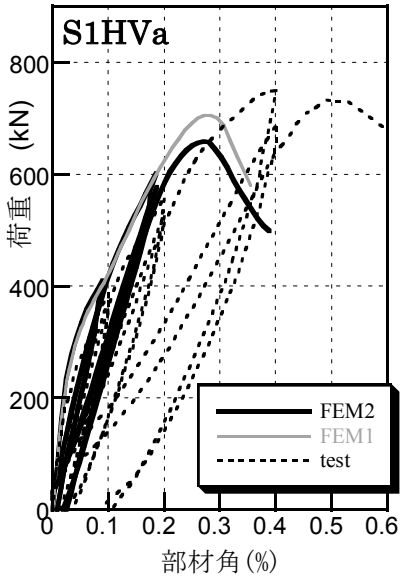
補強した試験体の実験結果と解析結果の比較および繰返し載荷解析の最大耐力時の破壊状況を，それぞれ**図－13～15** および**図－17～19** に示す。解析および実験の荷重と部材角関係を示した**図－13～15** より，補強試験体の解析結果は，単調載荷の最大耐力が実験値と比較してやや小さめの評価となっていることを除くと，ほぼ無補強試験体の解析結果と同様な傾向である。補強前と補強後の試験体の解析による破壊性状を比較すると，補強した試験体は補強していない試験体よりも，壁板全体を概観して壁板に発生しているせん断ひび割れ幅が狭くなっていることが分かる。特に補強量が多い程その傾向が強い。**表－4** の実験値と解析結果の最大耐力比較一覧の繰返し載荷解析結果より，補強していない試験体も補強した試験体もほぼ同等の評価となっており，CFRP 板は，同量の壁筋の効果を果たしているものと考えられる。よって、CFRP 板の補強量の違いによる最大耐力の違いは，壁筋増量による耐力増加として考えられる。以上のことから，補強した試験体の挙動も，今回の解析モデルで近似していると考えている。



図－12 UnR の解析と実験の比較



図－13 BHVa の解析と実験の比較



図－14 S1HVa の解析と実験の比較

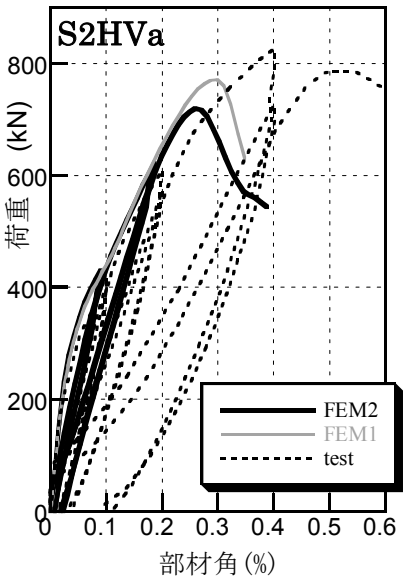


図-15 S2HVa の解析と実験の比較

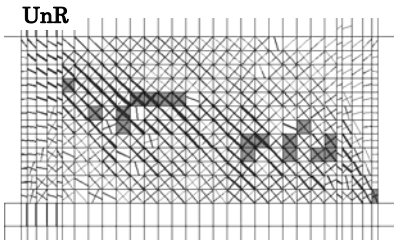


図-16 UnR 最大耐力時の破壊状況

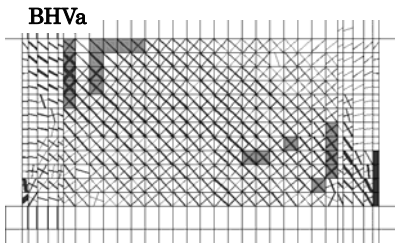


図-17 BHVa 最大耐力時の破壊状況

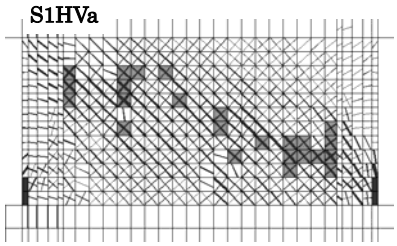


図-18 S1HVa 最大耐力時の破壊状況

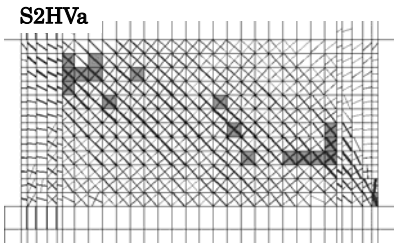


図-19 S2HVa 最大耐力時の破壊状況

表－4　実験値と解析結果の最大耐力比較一覧

	tQ (kN)	cal1Q (kN)	cal1Q / tQ	cal2Q (kN)	cal2Q / tQ
UnR	655	656	1.00	590	0.90
BHVa	836	804	0.96	759	0.91
S1HVa	749	722	0.96	659	0.88
S2HVa	826	771	0.93	719	0.87

5. 設計式の検討

CFRP 板による補強効果は 3 章の実験結果より，CFRP 板は壁筋と同様な働きを行うこと，および 4 章の解析で壁筋としてモデル化することにより評価が可能であることから CFRP 板の補強効果を，アーチトラス機構[6)]でのトラス機構に考慮することで評価できると考えられる。その設計式を式(1)に示す。用いた記号は文献 6)と同様である。

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

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

$p_{s(s)}$ ：既存壁板の壁筋比

$p_{s(cf)}$ ：壁筋の降伏点(N/mm^2)

$\sigma_{sy(s)}$ ：CFRP 板の補強筋比

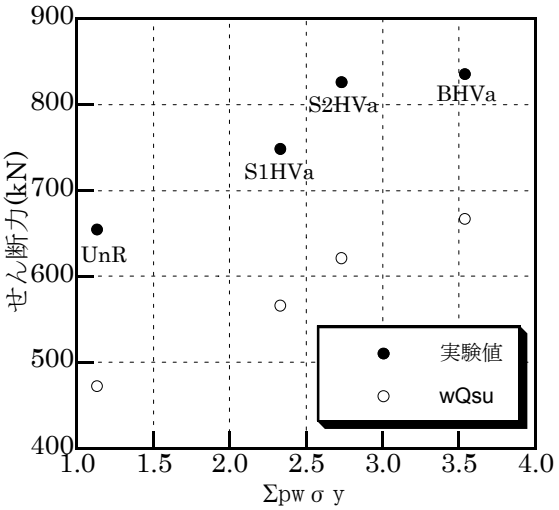
$\sigma_{sy(cf)}$ ：CFRP 板の有効強度(N/mm^2)

で，$\sigma_{sy(cf)} = E_{cf}\varepsilon_{cf}$ とする。

E_{cf} ：CFRP 板のヤング係数

ε_{cf} ：同ひずみ 2000×10^{-6}

計算結果を**図－20** に示す。この結果より，実験は式(1)で安全側の評価となっていることが分かる。



図－20　提案式による計算結果と実験値の比較

6. まとめ

既存無開口耐震壁の補強方法として，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) 無開口耐震壁にCFRP板を貼り付けて補強する方法は，せん断耐力を上昇させる補強効果があり，既存の有効な床面積をほとんど変えることがない補強方法として，効果的である。また片面から集中補強でも補強量に応じた補強効果が認められた。

(2) 補強された試験体の CFRP 板は，実験での壁筋と同様の性状を示すこと，および CFRP 板を壁筋置換した解析結果が実験値を近似していることから，壁筋として評価できる。

(3) 今回の繰返し載荷解析結果は，最大耐力を僅かながら小さく評価するが，提案するモデルを用いた FEM で実験結果をほぼ近似できている。

(4) 本工法で補強を行った無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。

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) 国土交通省：既存建築物の耐震診断・耐震改修の状況，H15 年 3 月 31 日

2) 萩尾 浩也，木村 耕三，勝俣 英雄：CFRP 板を用いた既存耐震壁の新規開口補強に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.2，pp. 1543- 1548，2006

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) 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

5) 長沼一洋，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp.135-142，2000.10

6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説，1998.