

論文 CFRP 板を用いた偏在ドア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

要旨：本論文では、偏在ドア開口耐震壁に 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について検討した。圧縮側および引張側柱際にドア開口を有する耐震壁に CFRP 板による補強を行った耐震壁と補強していない耐震壁の実験を行った。その結果、開口位置によって補強効果が異なることが分かった。実験結果は FEM 解析で評価することが可能であるため、開口位置の違う場合の数値実験を行った。実験結果と数値実験結果より、本工法で補強された有開口耐震壁のせん断耐力は、開口位置にかかわらず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, 有開口耐震壁, 偏在, CFRP 板, 接着, FEM 解析

1. はじめに

国の基本方針¹⁾では、今後 10 年間で住宅及び特定建築物の耐震化率を 75% から少なくとも 9 割にすることを目標に掲げている。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 板で補強した偏在ドア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し、約 1/3 スケールに縮尺した。試験体は比較対象のための無補強試

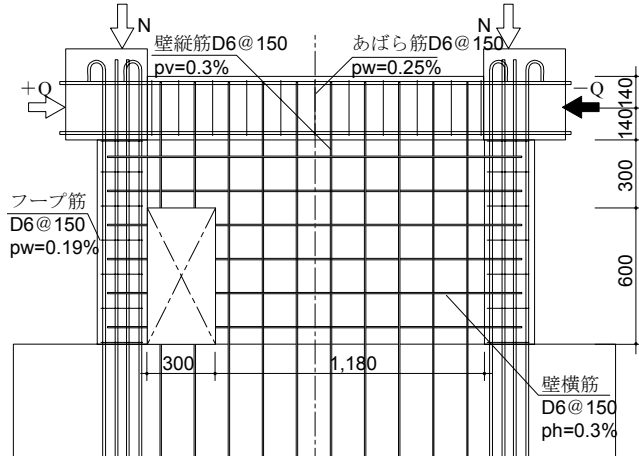


図-1 試験体形状および配筋図 (O3W)

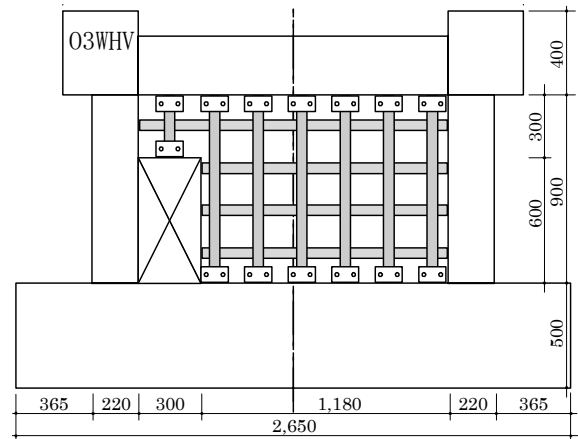


図-2 O3WHV の補強概要

表-1 試験体一覧

名称	E_c kN/mm ²	σ_B N/mm ²	柱	梁	壁	開口	補強方法
O3E	25.3	27.7	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 $\sigma_0=3.0$ N/mm ²	断面：170×280 主筋：8-D13 ($p_t=1.06\%$) 帯筋：D6@150 ($p_w=0.25\%$)	断面：70×1,480 壁縦筋：D6@150 ($p_v=0.30\%$) 壁横筋：D6@150 ($p_h=0.30\%$)	300×600	なし
O3EHV	25.5	26.9					壁全面縦横@200 $p_v(cf)=p_h(cf)=0.71\%$
O3W	25.3	28.8					なし
O3WHV	25.4	29.4					壁全面縦横@200 $p_v(cf)=p_h(cf)=0.71\%$

*1 大林組 技術研究所 建築構造研究室 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)

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	破断強度 N/mm ²
D6	帯筋と壁筋 とあばら筋	195	371	472
D13	柱と梁主筋	187	366	544
M12	定着ボルト	208	489 ^{*1}	580
CFRP	補強材	159	—	2,860

*1:0.2%オフセット

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	壁横筋 の降伏 kN	帯筋 の降伏 kN
O3E	653	200	393	505	—
O3EHV	807	242	428	595	734
O3W	648	222	600	-416	—
O3WHV	748	243	576	724	745

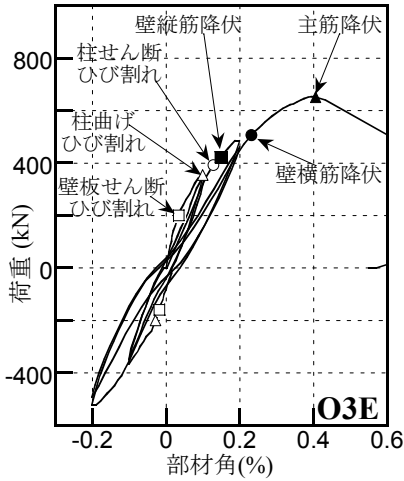


図-3 O3EのQ-R関係

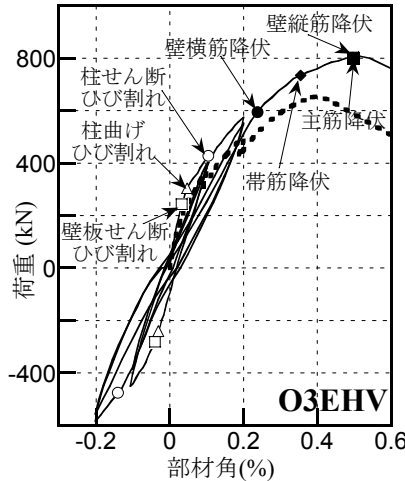


図-4 O3EHVのQ-R関係

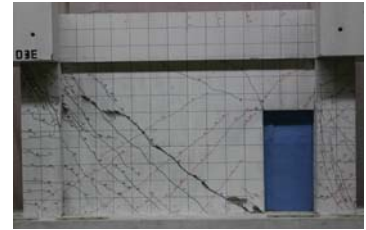


写真-1 O3Eの最終状況



写真-2 O3EHVの最終状況

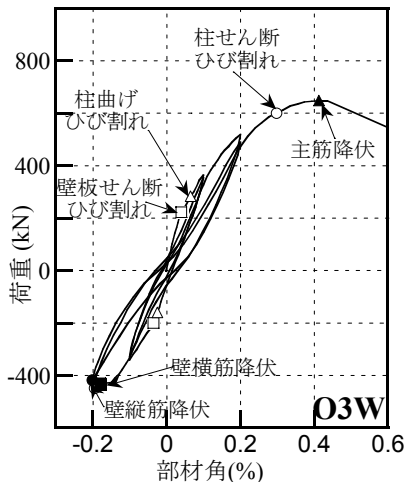


図-5 O3WのQ-R関係

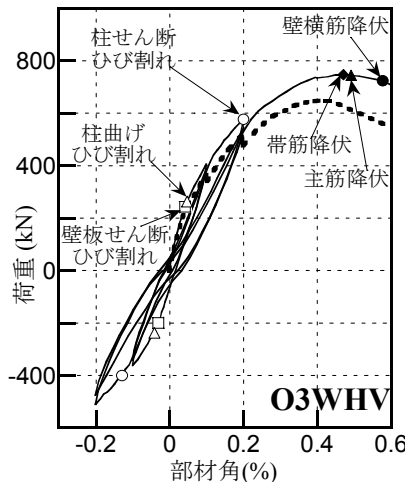


図-6 O3WHVのQ-R関係

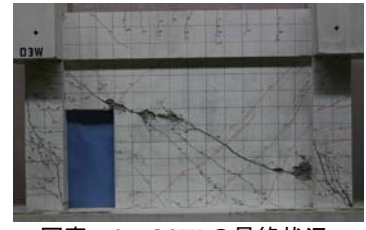


写真-3 O3Wの最終状況



写真-4 O3WHVの最終状況

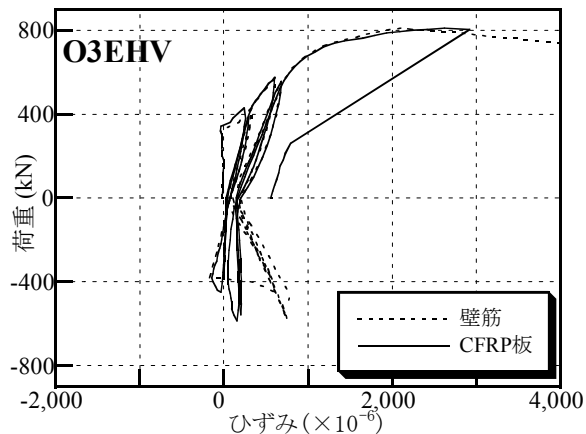


図-7 壁筋とCFRP板のひずみと荷重の関係(O3EHV)

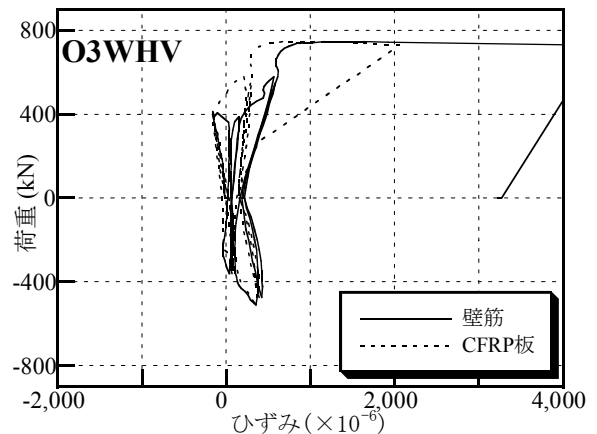


図-8 壁筋とCFRP板のひずみと荷重の関係(O3WHV)

験体、CFRP 板による補強試験体、および開口位置をパラメータとし、合計4体とした。試験体の名称は、正加力時に引張側となる柱に接する開口を有する試験体をO3Wとし、負加力時に引張側となる柱に接する開口を有する試験体をO3Eとした。その両者に補強した試験体をそれぞれO3WHVおよびO3EHVとした。試験体の一覧、無補強試験体の形状および配筋図（O3W）、並びに補強概要（O3WHV）を、それぞれ表-1、図-1、並びに図-2に示す。なお、試験体の開口周囲の開口補強筋は、配置されていない。CFRP板の貼付けは、縦方向および横方向とも粘性の高いエポキシ樹脂系の接着剤で接着した。その内、縦方向に貼り付けたCFRP板の端部は、フラットバー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上負繰返し載荷を行った。載荷履歴は、部材角 $\pm 1/1000$ 、および $\pm 2/1000$ をそれぞれ二回繰返しした後、正加力方向で押し切って破壊させた。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の荷重と部材角の関係、諸荷重一覧および破壊状況を、それぞれ図-3~6、表-3、および写真1~4に示す。図-4および図-6には、比較対象となる無補強試験体の包絡線を点線で示す。壁板のせん断ひび割れは、開口位置および補強の有無の違いによらず、ほぼ同時期に発生した。CFRP板による補強を行っても、壁板のせん断ひび割れの発生に対して、効果がほとんどないものと思われる。また、正加力時における無補強試験体O3Eの壁板のせん断ひび割れは、ほぼ45度方向に多く発生しているのに対して、O3Eと反対側に開口を有するO3Wはひび割れ角度が小さく本数も少ない傾向であった。このようひび割れ性状に異なった点が観察されたが、補強試験体O3EHVおよびO3WHVのひび割れは、ともにほぼ45度であった。全試験体の最終破壊はせん断破壊であった。上記のようにO3EおよびO3Wのせん断ひび割れ発生状況が違っても関わらず、最大耐力は、ほぼ同じであった。O3EHVおよびO3WHVの最大耐力は、O3EHVが大きい結果であり、開口位置によって補強効

果が異なることが分かった。また無補強試験体の梁のひび割れは、正加力側に開口がある場合に多く発生した。補強試験体O3EHVの梁のひび割れは最大耐力までほとんど発生せず、補強試験体O3WHVの梁のひび割れは、最大耐力近辺で発生したが、無補強試験体O3Wより少なかった。これによりCFRP板の補強により、梁への損傷が低減されたものと考えている。

3.2 壁筋のひずみとCFRP板のひずみ

補強試験体O3EHVおよびO3WHVの壁板のほぼ中央位置にある壁横筋とほぼ同位置にあるCFRP板のひずみと荷重の関係を図-7および図-8に示す。ともに壁筋のひずみとCFRP板のひずみは酷似した挙動をしており、CFRP板も壁筋とほぼ同様な働きをしているものと考えられる。また、CFRP板の最大ひずみは約 $3,000 \times 10^{-6}$ であった。中央にほぼ同じ大きさの開口を有する耐震壁でCFRP板を定着した補強実験²⁾のCFRP板のひずみと同等であった。

4. FEM解析

4.1 使用モデル

解析モデルは、試験体の壁厚、柱幅および梁幅が異なることを考慮し忠実に形状を再現するために、三次元モデルを採用した。壁板部は壁筋を分布鉄筋として考慮した六面体要素、柱は柱主筋を線材置換したトラス要素およびせん断補強筋を分布鉄筋として考慮した六面体要素、並びに梁は柱と同様なモデルで表現した。スタブも、柱と同様なモデルとした。補強に使用したCFRP板は材料試験に基づいたヤング係数を有する分布鉄筋として壁板部に配置した。ただし、実験で得られたひずみを元に $3,000 \times 10^{-6}$ 以降は応力を負担しない特性とした。コンクリートの構成則は、文献³⁾に基づき、壁板はせん断ひび割れ後の圧縮強度劣化を考慮した。繰返し載荷解析のコンクリートの材料構成則は文献⁴⁾に基づき図-9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。鉄筋とコンクリートは完全付着を仮定した。解析は実験と同様な載荷履歴で繰返し載荷を行った。なお、解析モデルは、対象性を利用して奥行き方向の半分のみとした。使用プログラムは、FINALである。

4.2 解析結果

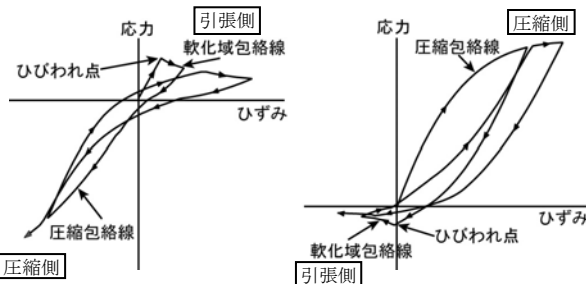
解析による荷重と部材角の関係および最大荷重時の破壊状況を、それぞれ図-10~13および図-14~17に示す。破壊状況の灰色のメッシュは、コンクリートの応力ひずみ関係で最大圧縮強度を超えた領域（以下、圧縮軟化域と呼称）に入ったことを示し、またひび割れを示す線は太いほど直交方向ひずみが大きいことを表す。表-4に示す実験の最大耐力に対する解析の最大耐力の比、

および解析および実験の荷重と部材角関係から、解析は実験を良く近似できていることが分かる。また、解析の破壊状況によるひび割れの角度、および圧縮軟化領域の部分から、実験の破壊状況を模擬していることが分かる。更には、解析でも壁板を補強することによって梁部材の損傷が減っていることも、実験結果を再現していると思われる。3.2節の荷重とCFRP板のひずみ関係、並びに壁筋と同様に置換して解析結果が実験結果を近似していることから、補強材であるCFRP板は壁筋とほぼ同様の効果を果たすものと思われる。

5. 設計式の検討

CFRP板による補強効果は、実験結果および解析結果より壁筋としてモデル化することで評価可能であることから、文献2)および5)と同様に、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。式(1)を用いた設計値と実験値を比較した結果を表-4に示す。この結果によると、本提案式は実験値を安全側に評価することが分かる。

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



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-9 繰返し応力下での履歴特性

表-4 実験結果に対する解析結果および設計値の比較一覧

	tQ (kN)	FEMQ (kN)	FEMQ tQ	wQsu (kN)	wQsu tQ
O3E	653	629	0.96	486	0.74
O3EHV	807	750	0.93	615	0.76
O3W	648	603	0.93	477	0.74
O3WHV	746	681	0.91	622	0.83

tQ：実験値，FEMQ：FEM解析値，wQsu：(1)式

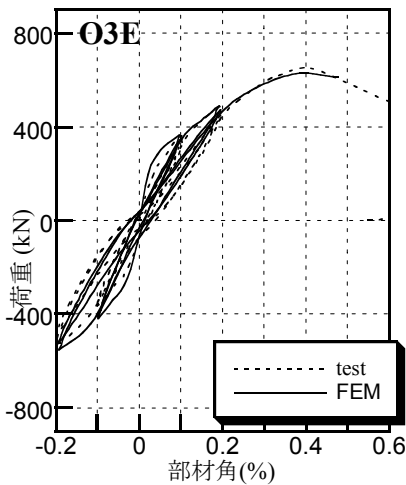


図-10 O3EのQ-R関係

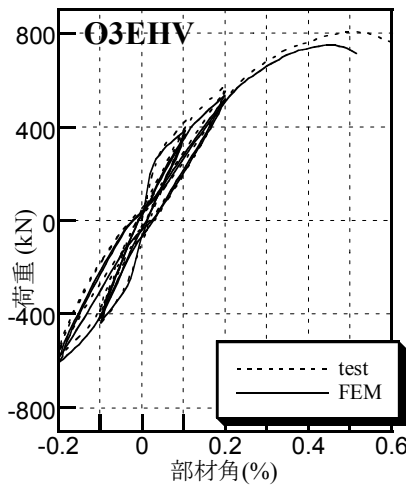


図-11 O3EHVのQ-R関係

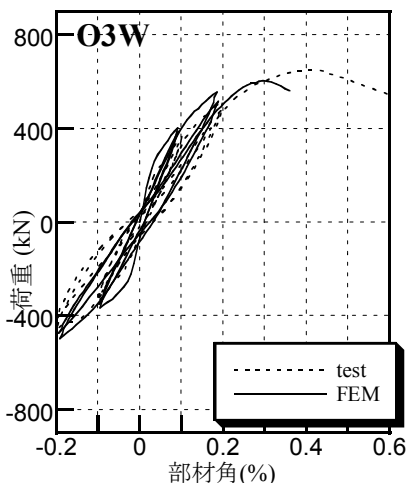


図-12 O3WのQ-R関係

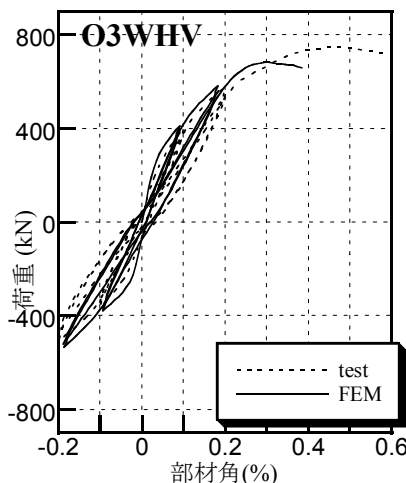


図-13 O3WHVのQ-R関係

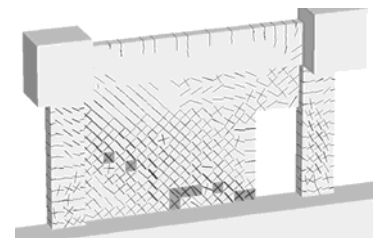


図-14 O3Eの最終状況

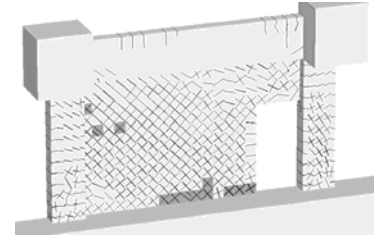


図-15 O3EHVの最終状況

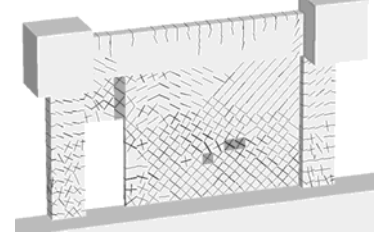


図-16 O3Wの最終状況

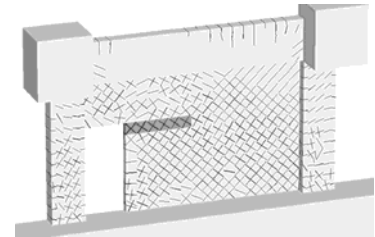


図-17 O3WHVの最終状況

r : 開口低減率 ($r = 1 - \max(\sqrt{h_o/h_1}, h_o/h)$)

t_w : 壁厚, l_{wb} : トラス機構の有効壁長さ, ϕ : トラス角度, θ : アーチ角度, l_{wa} : アーチ機構の有効壁長さ, v : コンクリート圧縮強度有効係数,

σ_B : コンクリート圧縮強度

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

$p_{s(s)}$: 既存壁板の壁筋比

$\sigma_{sy(s)}$: 壁筋の降伏点(N/mm²)

$p_{s(cf)}$: CFRP 板の補強筋比

$\sigma_{sy(cf)}$: CFRP 板の有効強度(N/mm²)

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

E_{cf} : CFRP 板のヤング係数

ϵ_{cf} : CFRP 板の有効ひずみ 3000×10^{-6}

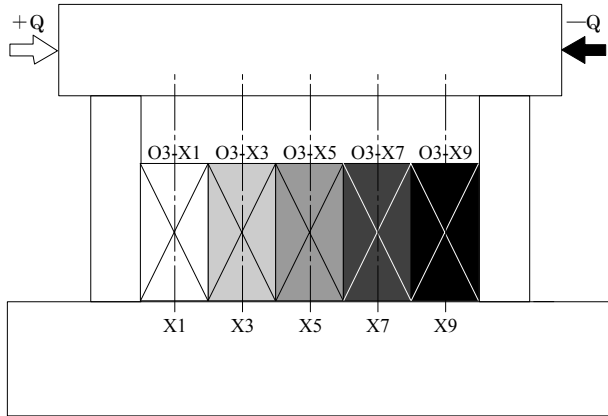


図-18 数値実験における開口の位置図

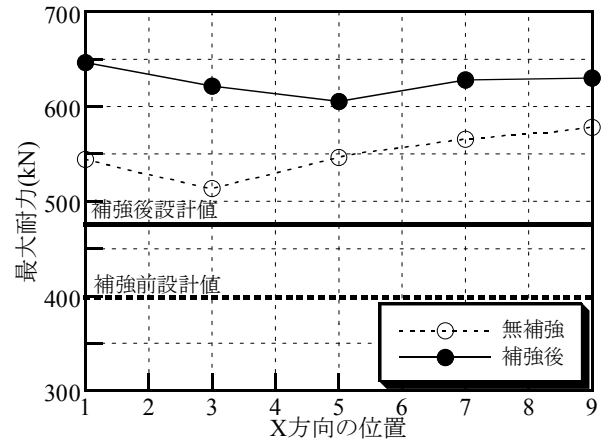


図-23 解析における開口位置と最大耐力の関係図

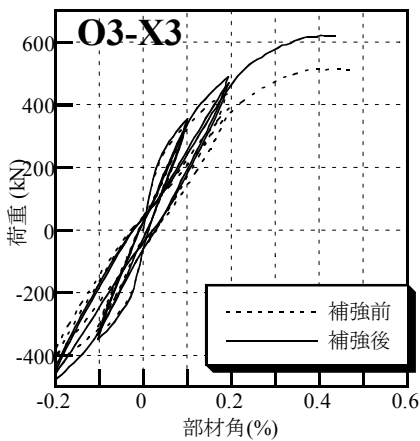


図-19 O3-X3 の Q-R 関係

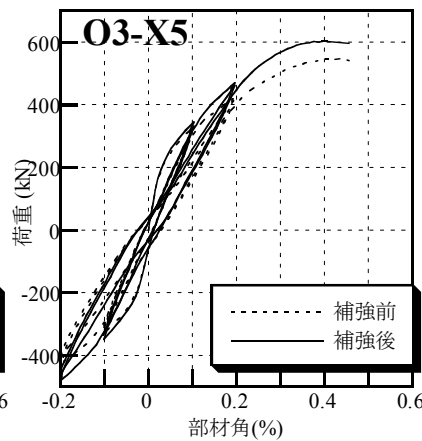


図-20 O3-X5 の Q-R 関係

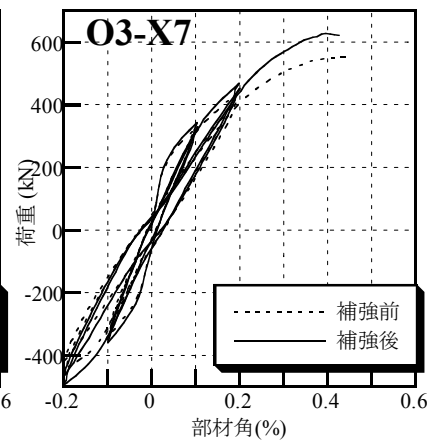


図-21 O3-X7 の Q-R 関係

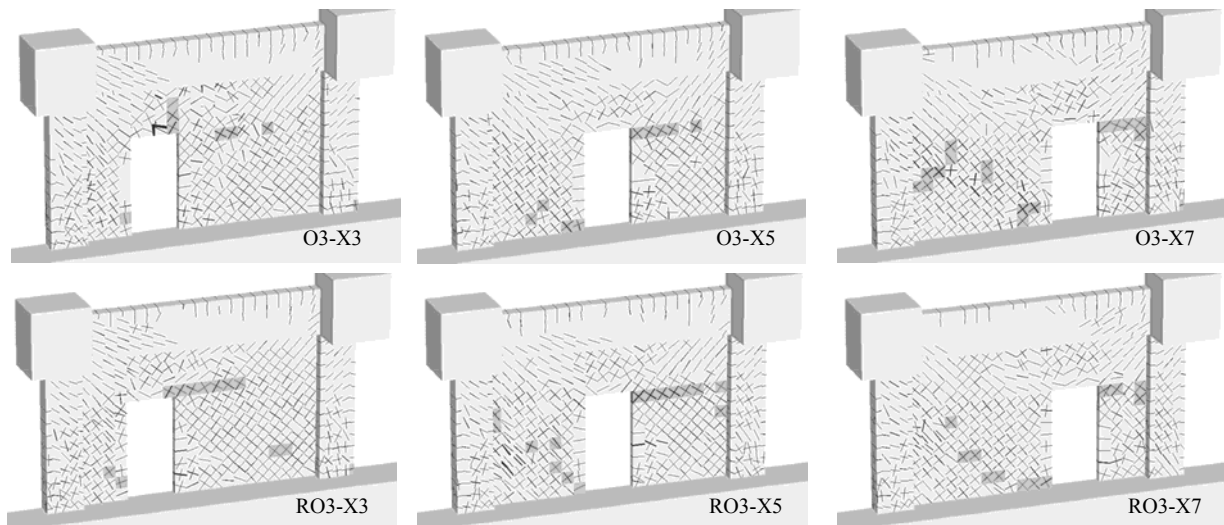


図-22 最大耐力時の解析の破壊状況

6. 数値実験

6.1 目的

実験で設計式の検証がなされたのは、開口位置が実験で行われた位置の場合のみである。しかし、実構造物では開口は実験と同じ位置に設けられるとは限らない。そこで、実験をよく近似する解析モデルを用いて、開口の位置をパラメータとした数値実験を行い、設計値の検証を行う。

6.2 解析条件

解析パラメータは、開口位置および補強の有無である。実構造物のコンクリート強度を踏まえ、本解析でのコンクリート強度は $F_c=21 \text{ N/mm}^2$ に統一した。実施工では CFRP 板の定着をしない場合もあるため、本解析では CFRP 板を定着しない場合²⁾を想定し、CFRP 板の特性として $2,000 \times 10^6$ まで応力負担できる特性とした。開口位置は、**図-18** に示すように、スパン方向に五種類の位置とした。補強を行った解析は実験で行った同量を配置し、解析の履歴は実験の履歴と同じとした。解析名称は、解析パラメータから構成され、例えば開口が**図-17**で示される開口中心の軸が X3 位置にある場合は、解析名称は O3-X3 となる。その位置で CFRP 板による補強がなされている解析の場合には、RO3-X3 のように先頭に R を付している。

6.3 解析結果

解析結果である荷重と部材角関係の代表例、および各最大荷重にける破壊状況を、それぞれ**図-19~21**および**図-22**に示す。補強の有無による違いは、初期剛性を含み部材角 $\pm 1/1000$ まで見られないが、部材角 $2/1000$ へ変形が進む過程において、補強された解析が補強されていない解析より剛性低下が少なく、まだ部材角 $2/1000$ での繰返しによる劣化も少ない傾向がある。他の解析ケースも同様な傾向であった。**図-23**に解析における開口位置と最大耐力の関係に、(1)式による補強前および補強後の設計値を記載して示す。これより全解析値は設計値を上回っていることが分かる。このことからコンクリート強度が 21 N/mm^2 でも、等価開口周比が 0.3 程度の開口であれば、ほぼどの位置でも提案する設計値で安全側に評価できることが分かった。

7. まとめ

偏在ドア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および解析を行い、以下のことが分かった。

- 1) 偏在ドア開口耐震壁に 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、梁の損傷を低減させる効果もある
- 2) 補強された試験体の CFRP 板は、実験で壁筋と同様の性状を示し、ほぼ壁筋と同様な機能を果たす。
- 3) 無補強有開口耐震壁実験および CFRP 板で補強された有開口耐震壁の実験結果は、提案するモデルを用いた FEM で近似できる。
- 4) 実験結果および数値実験結果より、本工法で補強を行った等価開口周比 0.3 の開口を有する耐震壁の耐力は、ほぼ開口位置にかかわらず提案する設計式で安全側に評価することができる。

謝辞

本試験体の製作にあたり、AGC 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：平成 18 年国土交通省告示第 184 号，H18.1.25
- 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：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) 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
- 5) 萩尾 浩也，栗田 康平，木村 耕三，勝俣 英雄：CFRP 板を用いた既存無開口耐震壁の補強に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp. 1195-1200，2007
- 6) 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