

# 論文 炭素繊維シートを用いたRC造有開口耐震壁の耐震補強・補修効果に関する実験的研究

松裏 眞佐代<sup>\*1</sup>・北野 敦則<sup>\*2</sup>・後藤 康明<sup>\*3</sup>・城 攻<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では開口付き鉄筋コンクリート造（以下 RC 造）連層耐震壁の1層部分を対象として、炭素繊維シート（以下 CF シート）と山形鋼を用いて補強し、その開口位置と開口形状が異なる場合のせん断補強及び補修効果を水平加力実験により検討した。その結果、開口位置等に関わらず CF シート補強により耐力及び変形性能が向上した。また、損傷した試験体についてはひび割れのエポキシ充填補修に加えて、帯筋の不足する付帯柱のみを CF シート補強することにより、耐力の回復と変形性能の向上が可能になった。

キーワード：RC 造開口付き耐震壁，炭素繊維シート，開口位置，破壊モード，補強効果

## 1. はじめに

地震力作用時において RC 耐震壁はその高剛性のため、水平力の負担割合は他の部材に比べ圧倒的に大きく、耐震壁の設計が構造物全体の耐震性を左右することが少なくない。そのため元来強度抵抗型部材である耐震壁にも地震作用時において、強度のみならず靱性が確保でき、入力エネルギー吸収性能が期待できれば望ましい。無開口の既存 RC 耐震壁の場合に、壁板のせん断圧縮破壊が先行すると力学的に CF シートによる補強は困難である。しかし、有開口の場合には、開口位置・形状により破壊形式が多様であり、開口部を利用した CF シート補強の可能性が残されている。本研究では、1971 年以前の旧建築基準法で設計された帯筋量の少ない開口付耐震壁を対象に、CF シートと山形鋼を用いて耐力・靱性共に優れた補強方法を提案することを目的としている。

せん断圧縮破壊が先行すると力学的に CF シートによる補強は困難である。しかし、有開口の場合には、開口位置・形状により破壊形式が多様であり、開口部を利用した CF シート補強の可能性が残されている。本研究では、1971 年以前の旧建築基準法で設計された帯筋量の少ない開口付耐震壁を対象に、CF シートと山形鋼を用いて耐力・靱性共に優れた補強方法を提案することを目的としている。

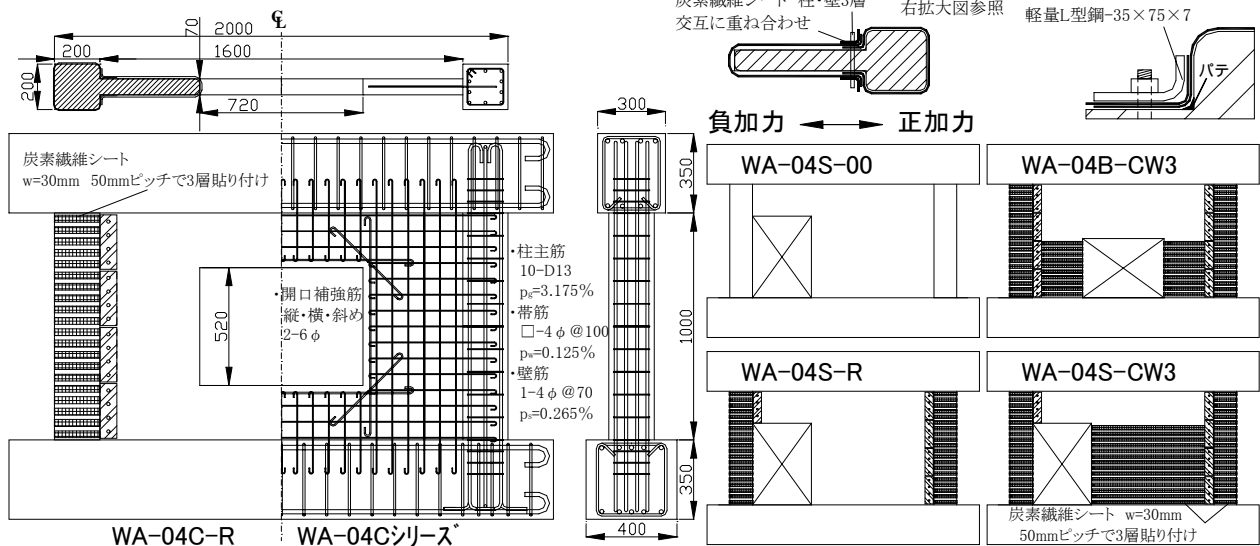


図 - 1 試験体形状・配筋図

\*1 鹿島建設（株） 工修（正会員）

\*2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 工修（正会員）

\*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

\*4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図 - 1 に試験体形状及び配筋図, 表 - 1 に試験体一覧, 表 - 2 に材料の力学的性状を示す。試験体は 3 層建物内における 1 スパン連層耐震壁の第 1 層を想定し, 大きさは約 1/3 の縮小模型を計 7 体作製した (試験種目では 9 体分)。

壁板は厚さ 70 mm, 内法寸法 1,000 × 1,600 mm であり, 等価開口周比 0.4 の開口を設けた。開口周囲は必要量の鉄筋 (AIJ-RC 規準<sup>1)</sup> に準拠) によって補強されている。このうち, 窓開口を壁中央にもつ試験体 WA-04C-00 (以下 C-00) と同形状の補強試験体 3 体の計 4 体は昨年度報告<sup>2)</sup> している。今年度は, C-00 を補修及び補強した WA-04C-R (以下 C-R), 窓開口を壁幅中央下部にもつ補強試験体 WA-04B-CW3 (以下 B-CW3), 通路開口 (縦型開口) が柱脇に偏在した試験体 WA-04S-00 (以下 S-00), S-00 を補修及び補強した WA-04S-R (以下 S-R), 同形状の補強試験体 WA-04S-CW3 (以下 S-CW3) の計 5 体である。両側柱の断面は, 200 × 200 mm で内法高さは 1,000 mm である。

配筋は, 柱主筋は 10-D13 (SD345), 帯筋は 4 @200 (SR295 級), 壁筋は縦横共に 4 @70 (SR295 級) で等間隔に配筋した。開口補強筋は縦横斜め共に 2-6 (SR295 級) とした。

CF シート接着方法は, 表面のケレンとコーナー部 (r=20 mm) を面取りした後, エポキシ系下地剤を塗布し, 硬化後に幅 30 mm の CF シートをエポキシ系樹脂を用いて 50 mm ピッチで 3 層に貼り付けた。いずれも, 厚さ 7 mm, 柱側フランジ 35 mm, 壁側フランジ 75 mm, 外法半径 17 mm の軽量 L 形鋼を用いて CF シート端部を定着させた。L 形鋼の長さは約 250 mm で, 柱内法長さ 1,000 mm を 4 分割した値である。鋼板の取り付け方法は, 鋼板と CF シートとの間にエポキシ系樹脂を充

表 - 1 試験体一覧

試験体名	開口位置 (用途)	開口寸法 高さ×幅	補修・シート補強位置	$\sigma_B$ (MPa)
WA-04C-00	上下左右 の中央 (窓)	520 × 720 (mm)	-	21.3
WA-04C-R			C-00を補修+柱	28.0
WA-04C-C3			柱	24.6
WA-04C-CW3			柱・袖壁	20.9
WA-04C-CO3			柱・袖壁・垂壁・腰壁	21.7
WA-04B-CW3	中央下(窓)	720 × 520 (mm)	柱・袖壁	24.2
WA-04S-00	下部柱脇		-	19.9
WA-04S-R	に偏在		S-00を補修+柱	25.5
WA-04S-CW3	(通路)	柱・袖壁	23.5	

$\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度

表 - 2 材料の力学的性状

使用材料	鋼種	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	$\sigma_{max}$ (MPa)	伸び (%)
主筋 D13	SD345	400	2210	581	22.8
帯筋・壁筋 4φ	SR295級	389	1950	469	23.8
開口補強筋 6φ	SR295級	421	2030	471	20.7
炭素繊維シート	設計強度: 3480MPa, 設計弾性率: 231GPa, 破断伸び: 1.5%, 設計厚さ0.111mm				

填し, M8 高強度貫通ボルトを用いて締め付けた。なお, 補修試験体はエポキシ樹脂, セメント系充填材を亀裂内に注入した後上記の補強を施した。

### 2.2 加力方法

等分布水平力を受ける 3 層連層耐震壁の第 1 層応力を再現する等価シアスパン比 1.13 となる加力点高さに変位漸増繰返し静的加力を行った。軸力は  $\sigma_B/6$  となる一定軸力を両柱上部に導入した。制御方法は柱内法スパンにおける層間変形角を R とし,  $R = 0.5 \times 10^{-3} \text{rad}$  (以降,  $\times 10^{-3} \text{rad}$  を省略) で  $\pm 1$  回,  $R=1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30$  で各  $\pm 2$  回繰返し加力を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 破壊状況

図 - 2 に最終破壊状況, 各部呼び名を示す。指示位置は固定用スタブからの高さで示す (例  $h_s = 500$ : スタブより 500 mm 上部)。加力方向は特定なき限り, 正負共通の性状である。

C-R は引張側袖壁, 圧縮側袖壁の対角線上にせん断亀裂が一気に発生し, 剛性低下が見られ

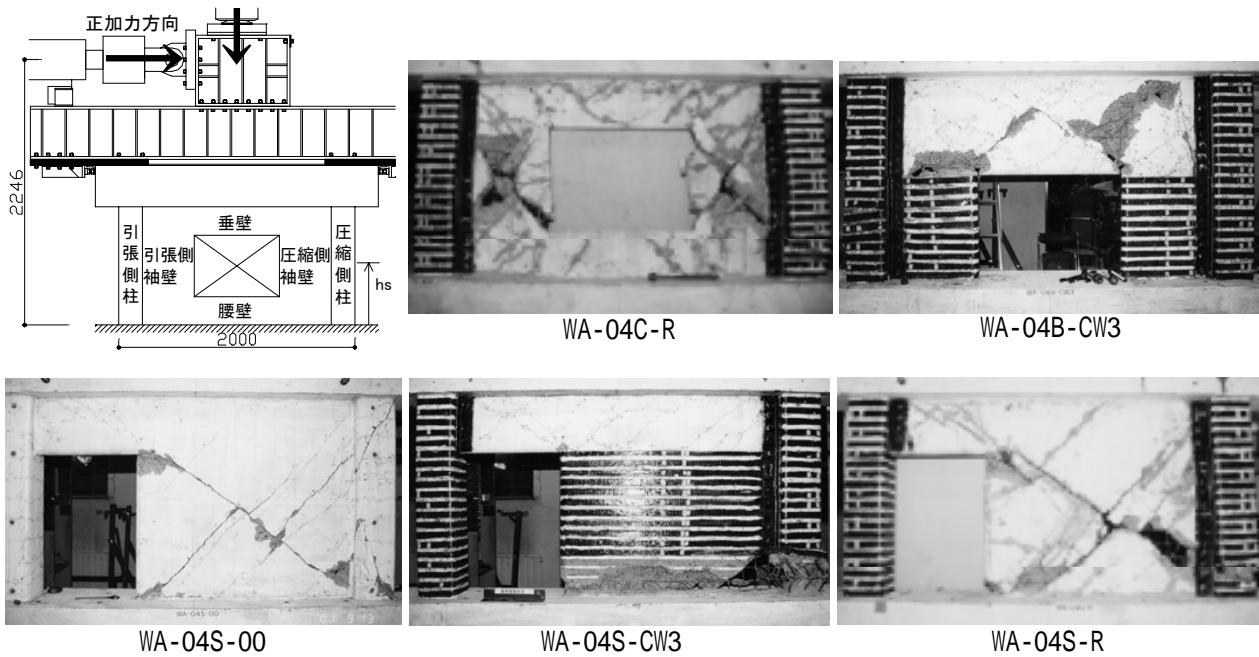


図 - 2 最終破壊状況

た。両袖壁のせん断亀裂は拡幅し、その亀裂に沿って縦及び横壁筋が降伏した。引張側柱は  $h_s = 500 \sim 800 \text{ mm}$ 、圧縮側柱は  $h_s = 200 \sim 500 \text{ mm}$  で大きくせん断変形し、最大耐力に達した。R = 20 で圧縮側柱  $h_s = 100 \sim 250 \text{ mm}$  のCFシートが破断した。

B-CW3 は引張側柱の主筋が  $h_s = 500 \text{ mm}$  まで降伏し、剛性低下が見られた。開口縦補強筋の定着フック付近でコンクリートが急激に圧壊し、最大耐力に達した。両袖壁 CF シート補強部はせん断変形よりも脚部の曲げ亀裂が拡幅する性状を示した。R = 29 で圧縮側柱脚部のシートが破断した。これは、CFシートの定着部であるL形鋼板角部で破断したものであるため、大変形時を想定した場合にはL形鋼板角部の外法半径を大きくするなどの改善が求められる。

S-00 の正加力時は、R = 2.2 で袖壁対角線上に一気にせん断亀裂が発生し、壁を拘束していた圧縮側柱脚にせん断亀裂が多数発生して最大耐力に達した。最大耐力後袖壁・圧縮側柱脚のせん断亀裂が拡幅し、圧縮側柱のせん断補強筋が降伏して、耐力が急激に低下した。

S-00 の負加力時は、正加力時と同様、袖壁対角線上のせん断亀裂が多数発生して最大耐力に

達し、これらの亀裂の拡幅で耐力が急激に低下した。圧縮側独立柱部には付着割裂がみられた。

S-CW3 の正加力時は、袖壁脚部に開口側から曲げ亀裂が水平に発生し、引張側柱の主筋及び袖壁脚部の開口縦補強筋が降伏した。圧縮側柱脚付近を中心に曲げ回転し、最大耐力に達した。最大耐力後、圧縮側柱脚及び袖壁脚部でコンクリートの圧壊が激しく進行して耐力が低下した。

S-CW3 の負加力時は、袖壁脚部が正加力で大きく拡幅した曲げ亀裂に沿って、袖壁が加力方向に滑り、最大耐力に至った。袖壁脚部 CFシートの歪が増大し、R = 30 でシートが破断した。

S-R の正加力時は、壁対角線上に一気にせん断亀裂が発生し、剛性低下が始まった。引張側柱主筋が降伏し、最大耐力に達する。最大耐力後、柱及び壁のせん断亀裂が拡幅し、圧縮側柱脚のせん断補強筋が降伏した後、袖壁下部鋼板付近のコンクリートの圧壊により耐力が低下した。その後、両柱で耐力を負担する形に移行し、圧縮側柱脚部 CFシートが R = 20 で破断した。大変形時は柱が耐震壁としての水平耐力を大きく負担していたことがわかる。

S-R の負加力時は、正加力時と同様、袖壁にせん断亀裂が発生し、このせん断亀裂が拡幅し

て最大耐力に達した。

### 3.2 荷重変形関係

図 - 3 に包絡線の比較を示す。

#### (1) 損傷壁の補修・補強効果

初期剛性は開口位置・形状に関わらず C-00 や S-00 に比べて C-R や S-R ではやや低い。中央窓開口試験体については、C-R は補修・補強により最大耐力が 10% 上昇し、耐力の回復が見られた。偏在通路開口試験体については、S-R は補修・補強で最大耐力が正加力 19%、負加力 9% 減少し、耐力の回復は C-R 程見られなかった。これは、柱補強により早期の柱せん断破壊は防止されたが、損傷を受けた袖壁のひび割れ補修が不十分であったと考えられる。最大耐力後 S-00 は急激に耐力低下したのに対し、S-R は  $R = 10$  まで最大耐力の 80% を維持したが、補修試験体での大変形時の耐力維持はできなかった。

#### (2) 偏在通路開口壁の補強効果

S-CW3 の正加力時においては、最大耐力は S-00 に比べて 4% 減少している。これは、引張側に開口部があるために曲げ引張降伏形となるので、せん断補強形のシート貼付方法では最大耐力時の補強効果が少ないものと考えられ、耐力減少は実験誤差の範囲であろう。しかし、最大耐力後は、壁及び柱のせん断破壊を防いだために S-00 のように急激な耐力低下はなく、 $R=15$  まで曲げ変形したが、柱及び袖壁脚部のコンクリートが圧壊したことで耐力低下した。S-CW3 の負加力時においては、最大耐力は S-00 に比べてほぼ同等である。これは柱及び袖壁をせん断補強したことによる補強効果はあったと思われるが、正加力時の壁脚曲げ亀裂の拡幅が負加力時の壁脚滑り変形を誘発したため、結果的に最大耐力の上昇には現れなかった。また、最大耐力後に生じた袖壁の開口側方向への滑りは、水平方向の繊維補強方法では防げない。正負加力時とも大変形時の耐力維持はできなかったため、補強方法の改善について今後の課題としたい。

#### (3) 開口位置による影響

窓開口試験体 C-CW3, B-CW3 は、両柱と袖

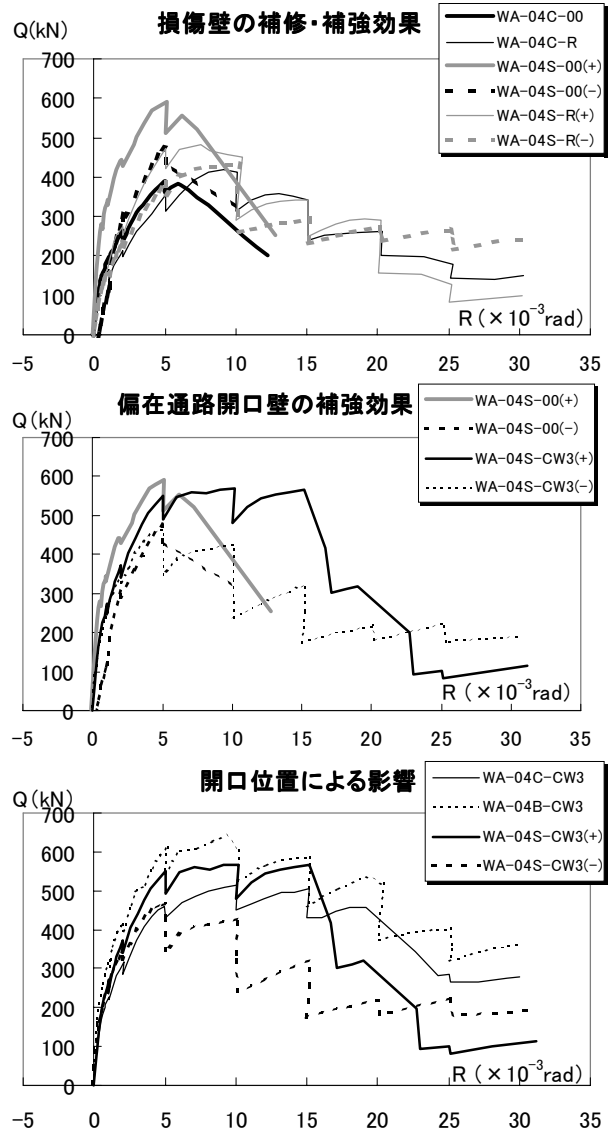


図 - 3 包絡線の比較

壁がせん断破壊するために CF シートによるせん断補強効果が大きく最大耐力の向上と大変形時での耐力維持が可能になった。一方、開口が偏在した場合、開口側引張時の全体曲げ変形と壁脚部水平亀裂の逆加力時への影響が大きく、窓開口と同様の柱と袖壁のシート水平巻き補強では、耐力の増大効果は小さく、靱性の向上も期待できない場合があるなどの相違が生じた。

### 3.3 変形成分比の比較

試験体の変形を柱頭・柱脚部滑り変形、全体曲げ変形、全体せん断変形にわけ、層間変位に対する割合を図 - 4 に示し、比較する。

#### (1) 損傷壁の補修・補強効果

最大耐力時近傍の  $R = 10$  では C-00 に比べて、

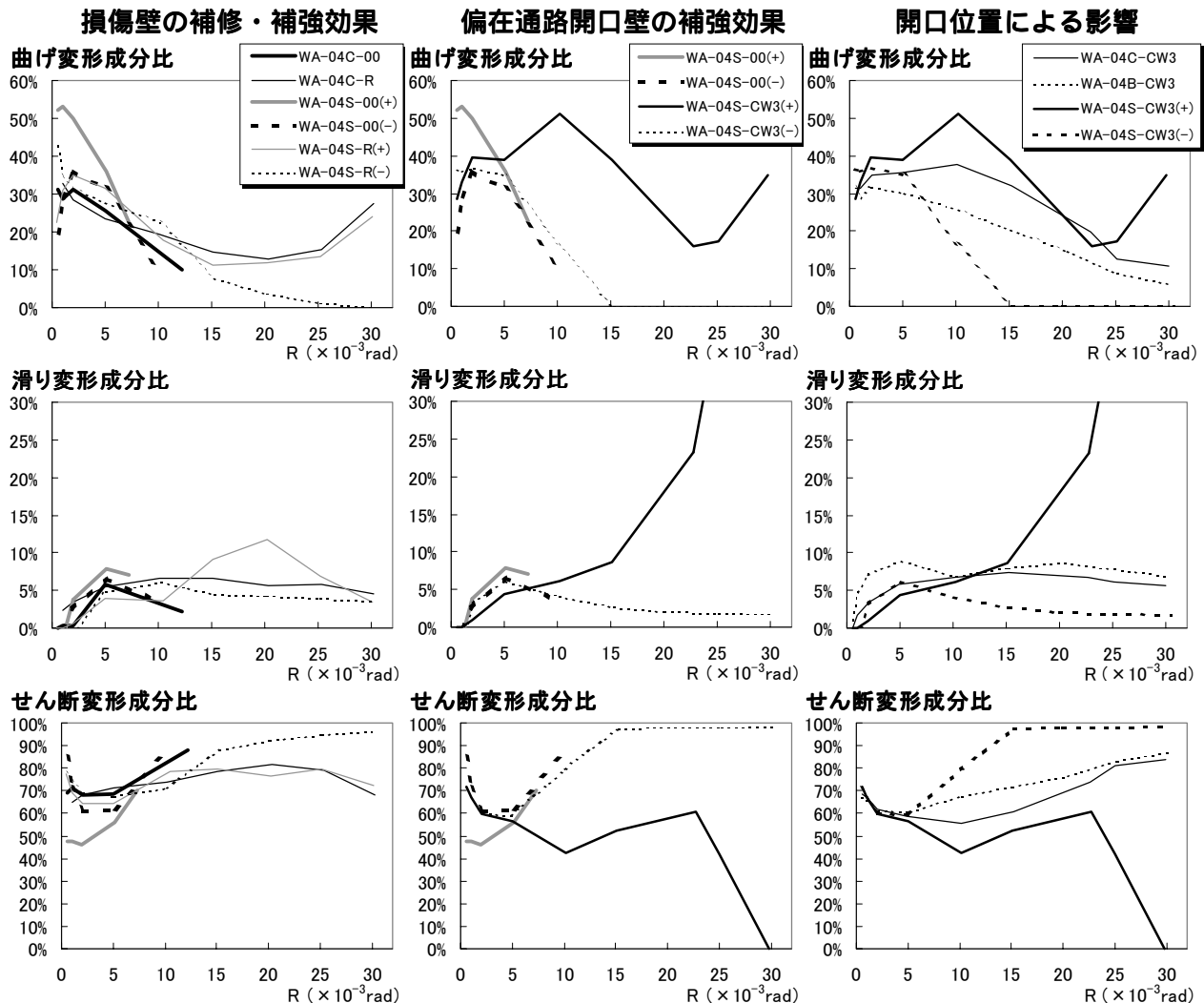


図 - 4 変形成分比の比較

C-Rの方が曲げ変形成分が増加し、せん断変形成分が減少していることから、補修・補強によるせん断破壊防止効果が表れている。偏在通路開口試験体も同様である。最大耐力後は、S-Rを除き、せん断変形成分比の急激な増加が見られない。これはCFシート補強により、せん断変形の維持及び減少させたことが表れている。

(2) 偏在通路開口壁の補強効果

補強により柱脚の早期のせん断破壊を防ぐことで S-CW3 (+) は、曲げ変形成分が増加した。S-CW3における最大耐力後の曲げ変形成分の減少は、圧縮側柱脚付近の圧壊に伴うもので、これを防ぐことが可能であれば、曲げ変形が維持できると思われる。S-CW3 (+) の滑り変形は R = 15 以降で急激に増加しているのは、圧縮

側柱脚のCFシート破断により柱脚が加力方向に押し出されたためである。

(3) 開口位置による影響

最大耐力 R = 10 において、補強試験体の曲げ変形成分は、S-CW3 (-)、B-CW3、C-CW3、S-CW3 (+) の順で後者ほど大きくなり、開口が偏心し、かつ圧縮対角線上近づくほど曲げ変形成分は減少する傾向がある。

3.4 実験値と計算値の比較

表 - 4 に最大耐力時の水平力・層間変形角、また、限界部材角を最大耐力の80%に低下した時点での部材角として一覧を計算値と併せて示す。各試験体は開口を持つため、基本的に AIJ-RC 規準<sup>1)</sup>に従い開口低減率 (r = 0.6) を乗じてせん断耐力を求めた。但し、偏在開口試験

表 - 3 最大耐力時の実験値と計算値一覧

試験体名	$\sigma_B$ (MPa)	$Q_{exp}$ (kN)	$R$ ( $\times 10^{-3} rad$ )	$Q_{cal1}$ (kN)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal1}}$	$Q_{cal2}$ (kN)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal2}}$	$Q_{cal3}$ (kN)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal3}}$	$R_{0.8Q}$ ( $\times 10^{-3} rad$ )	破壊モード
WA-04C-00	21.3	389	5.0	287	1.36	368	1.06	533	0.73	6.1	柱・袖壁せん断破壊
WA-04C-C3	24.6	486	9.2	306	1.59	334	1.46	552	0.88	20.0	袖壁せん断破壊
WA-04C-CW3	21.8	516	10.1	445	1.16	432	1.20	536	0.96	19.1	垂壁せん断破壊
WA-04C-CO3	22.6	523	10.2	449	1.16	444	1.18	540	0.97	19.1	袖壁せん断破壊
WA-04C-R	28.0	420	9.1	326	1.29	365	1.15	571	0.74	15.1	袖壁せん断破壊
WA-04B-CW3	24.2	642	9.3	460	1.40	469	1.37	549	1.17	19.3	垂壁圧壊・せん断破壊
WA-04S-00(+)	19.9	592	5.1	468	1.27	586	1.01	544	1.09	6.2	柱・袖壁せん断破壊
WA-04S-00(-)		474	5.1	281	1.69	351	1.35	530	0.89	5.1	柱・袖壁せん断破壊
WA-04S-CW3(+)	23.5	568	10.2	759	0.75	764	0.74	551	1.03	15.1	柱・袖壁脚部曲げ圧壊
WA-04S-CW3(-)		466	5.1	456	1.02	458	1.02	551	0.85	10.1	壁脚部滑り破壊
WA-04S-R(+)	25.5	481	7.6	523	0.92	573	0.84	562	0.86	10.5	柱・袖壁脚部曲げ圧壊
WA-04S-R(-)		432	9.3	314	1.38	344	1.26	562	0.77	10.2	袖壁せん断破壊

$$Q_{cal1} = r \cdot \left\{ \frac{0.068 \cdot p_{te}^{0.23} \cdot (\sigma_B + 17.7)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{sy} + \alpha \cdot \beta \cdot p_{wf} \cdot \sigma_f} + 0.1 \sigma_0 \right\} \cdot b_e \cdot j \quad (1)$$

$$Q_{cal2} = r \cdot \left\{ t_w \cdot l_{wb} \cdot (p_s \cdot \sigma_{sy} + \alpha \cdot \beta \cdot p_{wf} \cdot \sigma_f) \cot \phi + \left\{ \tan \theta (1 - \gamma) t_w \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B \right\} / 2 \right\} \quad (2)$$

$$Q_{cal3} = \frac{M_u}{h}, \quad M_u = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4 a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot D + 0.5 N \cdot D \left( 1 - \frac{N}{B \cdot D \cdot \sigma_B} \right) \quad (3)$$

: シート強度の低減率 = 2/3, : 斜め亀裂に対して有効なシート拘束方向に対する低減率 = 1/2

$p_{wf} = a_f / (b_e \cdot x_f)$ : シート補強量(%),  $a_f$ : CF シート 1 層の断面積 (= 0.111 × 2 × 30 mm<sup>2</sup>)

$x_f$ : CF シート補強間隔 (= 50 mm),  $f$ : シート破断強度(MPa)      他の記号は各文献を参照されたい

体の正加力時においては開口は存在するが圧縮対角ストラットにかかる面積が少ないので、低減率を用いないで計算した。また、補強試験体については CF シートの項を鉄筋の項に含めて計算した。せん断破壊型の試験体は AIJ-指針<sup>3)</sup>に基づく補強式(2)が広沢修正式<sup>4)</sup>に基づく補強式(1)に比べて対応がよいものが多い。しかし、全般に計算値を過小評価し、柱のシート補強効果が算入されていないことが原因と思われる。曲げ破壊型の試験体は式(3)で評価できる。

#### 4. 結語

開口部を有する RC 耐震壁の側柱ないしは開口部脇の袖壁に CF シートを水平に巻き付ける方法による補強効果は次のようにまとめられる。

1. 柱のみの補強によっても開口形状や位置に関わらず、変形能力が向上する。
2. さらに袖壁補強を伴うと一般に耐力及び変形能力が増大する。
3. 但し、偏心開口壁で開口側が曲げ引張とな

る場合は、曲げ降伏先行となりやすく補強による最大耐力増大は小さく、逆加力時に壁脚の滑り破壊を生ずることがある。

4. せん断終局耐力の評価は、柱補強効果を加える必要がある。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり日鉄コンポジット(株)より材料及び研究費の補助を頂いた。記して謝意とする。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999
- 2) 宇都宮永三ほか：炭素繊維シートを用いた窓開口付き耐震壁の耐震補強に関する実験的検討，コンクリート工学，Vol.23，No.1，pp.991-996，2001.6
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- 4) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，1990