

# 論文 炭素繊維シートを用いた窓開口付耐震壁の耐震補強に関する実験的検討

宇都宮永三\*1・北野敦則\*2・後藤康明\*3・城 攻\*4

**要旨:** 本研究では窓開口付き鉄筋コンクリート造(以下 RC 造)耐震壁を対象として, 炭素繊維シート(以下 CF シート)と山形鋼を用いて補強し, その補強部位を側柱・開口両横壁板・開口上下壁板の順に拡大させた場合のせん断補強効果を水平加力実験により検討した。その結果帯筋の不足する付帯柱のみを補強することによっても耐力・変形性能は共に上昇する, 更に窓開口周囲の壁を補強することで最大耐力後の耐力低下を減少させることができることなどが明らかになった。

**キーワード:** RC 造開口付き耐震壁, 炭素繊維シート, 補強部位, 破壊モード

## 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, 入力エネルギー吸収性能を期待し, 強度のみならず靱性が確保できれば望ましい。

既存 RC 耐震壁の補強で無開口の場合は, 壁板のせん断圧縮破壊が先行すると 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, 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 年前の旧建築規準法<sup>1)</sup>で設計された帯筋量の少ない窓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

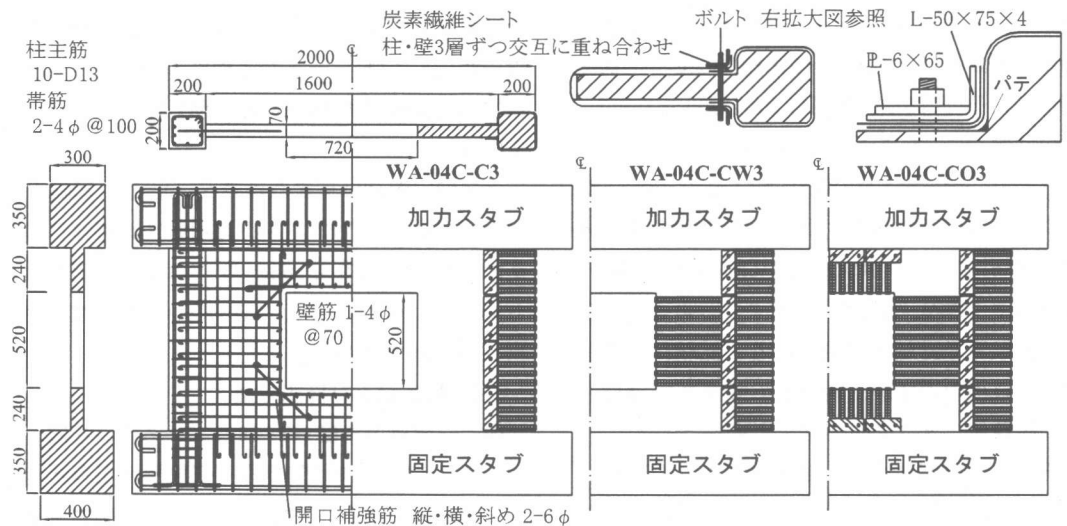


図-1 試験体概要

\*1 北海道大学大学院生 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (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)

表-1 試験体一覧

(mm)

試験体名	側柱	壁板	開口形状	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	補強部位
WA-04C-00	200×200	1600×1000	720×520 開口周比 0.4	21.3	2.20	無補強
WA-04C-C3	主筋10-D13	厚さ 70		24.6	2.39	両側柱 (全長)
WA-04C-CW3	帯筋2-4φ@100	壁筋縦横共 4φ@70		20.9	1.60	側柱+袖壁
WA-04C-CO3	$p_w=0.13\%$	$p_s=0.26\%$		21.7	2.12	側柱+袖壁+腰・垂壁

を提案することを目的としている。

表-2 鉄筋の力学的性状

使用部位	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_{max}$ (MPa)	Es(GPa)
柱主筋 D13(SD345)	396	0.240	570	165
柱帯筋 4φ(SR295)	365	0.193	451	189
壁筋 4φ(SR295)	365	0.193	451	189
開口補強筋 6φ(SR345)	426	0.215	480	198

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1 に試験体一覧、表-2, 3 に材料の力学的性状、図-1 に試験体概要図・配筋図を示す。試験体は、3層多スパンのRC ラーメン架構に内蔵される1スパン連層耐震壁の第1層を想定し、鉛直荷重と等分布水平力を受ける際の壁脚部曲げモーメントとせん断力との比=1.13 から、1層独立耐震壁に置換した試験体の水平加力点高さを定めた。試験体の大きさは縮尺を約1/3とし、全く同じ形状・配筋で計4体作製した。

壁厚さは70mm、壁板内法寸法は1,600×1,000mmであり、その中央部に720×520mmの窓開口(等価開口周比=0.4)を設け、開口周囲は必要量の鉄筋(RC規準<sup>2)</sup>に準拠)によって補強されている。両側柱の断面は200×200mmである。

配筋は、柱主筋に10-D13(SD345:  $p_g=3.18\%$ )、帯筋には□-4φ@100(SR295級:  $p_w=0.13\%$ )、壁筋には4φ@70(SR295級:  $p_s=0.26\%$ )、開口周囲補強筋には各方向に2-6φ(SR345級)を用い、設計強度20MPaの低強度コンクリートを使用した。実験変数は補強部位であり、試験体を両側柱、開口横の両壁板、開口上下壁板の3部位とし、試験体ごとに補強部位を変更した。

CFシート接着方法は、表面のケレンと側柱及び壁開口周辺の出隅部を $r=20\text{mm}$ に面取りした後、エポキシ系下地剤を塗布し、硬化後に30mm幅のCFシートを、エポキシ系樹脂を用いて50mmピッチで3層接着させた。いずれの試験体も厚さ4mm×柱側フランジ50mm×壁側フランジ75mmに成形した軽量山形鋼を用いて、壁端を両面か

表-3 炭素繊維シートの性能

設計厚さ (mm)	0.111
設計強度 (MPa)	3480
設計弾性率 (GPa)	231
破断伸度 (%)	1.5

ら拘束するように補強し、CFシートを内側に定着させた。柱曲げ剛性を極度に变化させないことを考慮して山形鋼長さを約250mmに分割して用いた。またCFシート柱定着部の壁フランジ側には厚さ6mmの鋼板を添え、面外剛性を確保している。

上記の山形鋼は柱またはスタブ沿いに70mmピッチで穴を穿ちM12ボルトを用いて試験体に取り付けた。試験体WA-04C-C3では普通強度ボルトM12を、WA-04C-CW3, WA-04C-CO3は高強度ボルトM12を用いている。

### 2.2 加力および計測方法

加力装置概要を図-2、加力プログラムを図-3に示す。加力方法は壁頭水平変位漸増正負繰返し静的加力とし、柱軸力比1/6の定軸力を導入した。この水平力は極力壁幅中心近くで導入され、鉛直荷重は直接柱に加わるように考慮した。制御方法は柱内法スパンにおける層間変形角をRとし、 $R=1/2000\text{rad}$ で±1回、 $R=1/1000$ ,  $1/500$ ,  $1/200$ ,  $1/100$ ,  $1/67$ ,  $1/50$ ,  $1/40$ ,  $1/33\text{rad}$

で各±2回繰返し加力を行った。計測は、水平荷重・変位、軸方向荷重・変位、側柱各高さでの2方向変位、開口隅角部周辺での2方向変位、試験体の各部せん断変形角と、柱主筋、せん断補強筋、壁筋、CFシートの各歪度を随時計測し記録した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 破壊状況

図-4に最終破壊状況を示し、以下に亀裂発生状況をまとめる。水平加力による全体曲げを考えたとき引張り側の柱と壁板をそれぞれ「引張柱」、「引張側壁板」と呼び、圧縮側も同様である。発生位置を固定用スタブからの高さで示す(例  $hs=500$ :スタブより500mm上部)。

全ての試験体に共通して、以下の順で亀裂が発生した。層間変形角  $R=0.2 \times 10^{-3} \text{rad}$  (以下  $R=0.2$  と記す)程度の微小変形時に引張側壁上部と圧縮側壁下部の順で開口隅角部にせん断亀裂が生じ、引張側壁上部の加力スタブ沿いに曲げ亀裂が発生した。次に  $hs=0 \sim 300$  の範囲で引張柱に曲げ亀裂が、ほぼ同時に引張側壁板にせん断亀裂が発生し、WA-04C-00, WA-04C-C3, WA-04C-C03は  $R=0.5 \sim 1.0$ , WA-04C-CW3は  $R=1.5$  であった。約  $R=2.0$  で引張側柱にせん断亀裂が発生し、次に圧縮側壁板にもせん断亀裂が発生するが試験体によって異なり、WA-04C-00とWA-04C-C3は  $R=2.0$ , WA-04C-C03とWA-04C-CW3は  $R=5.0$  程度であった。

最終破壊状況は試験体によって異なるので、以下に試験体ごとにまとめる。またWA-04C-00を除く全ての試験体は実験終了後も軸力比0.6以上の軸耐力を保持していたことを確かめ、このことから柱補強により鉛直部材としての機能を十分有することがわかる。

#### WA-04C-00 (無補強基準試験体)

WA-04C-00は引張・圧縮両壁板に斜張力によるせん断亀裂が発生・拡幅し( $R=5.0$ )その亀裂に対応する位置で壁筋が降伏した。その亀裂が両側柱を貫通し拡幅することで急激に変形が進み耐

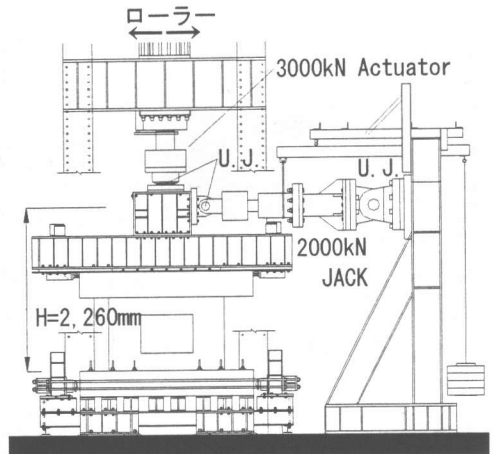


図-2 加力装置図

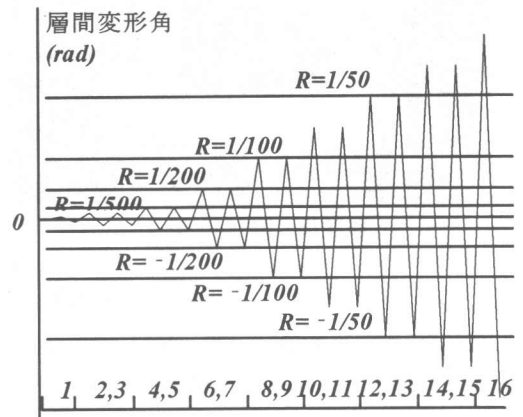


図-3 加力プログラム図

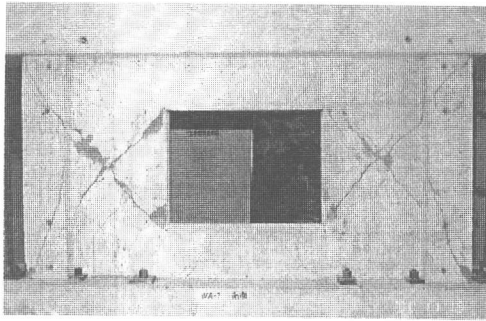
力を失った。このとき引張側柱の上部と圧縮側柱の下部における柱帯筋が引張り降伏していた。両側の袖壁付き柱のせん断破壊と判断される。

#### WA-04C-C3 (両側柱を補強)

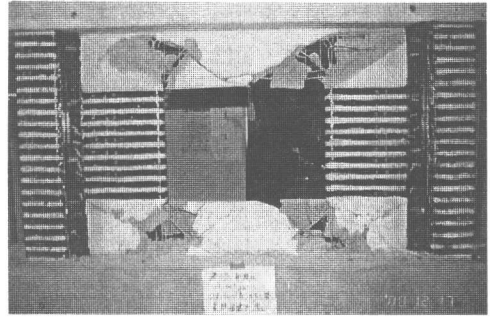
試験体WA-04C-C3の破壊は開口横の両壁板に集中した。基準試験体と同様に両壁板における斜め亀裂の発生と共に壁筋の歪が増加し、 $R=2.0$ で降伏した。最大耐力を示した  $R=10.0$ ではせん断亀裂の拡幅が顕著になり、壁筋の降伏範囲が広がり、引張・圧縮柱共に柱脚部分で降伏した。この両壁板のコンクリートが剥落し、徐々に耐力を失った。最終的には両側柱の曲げ耐力で水平力を負担していた。

#### WA-04C-CW3 (両側柱と開口横壁板補強)

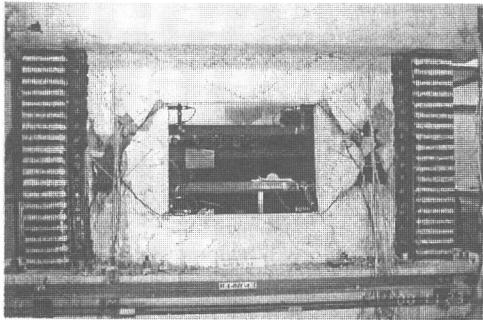
WA-04C-CW3の破壊は開口上下の垂壁・腰壁に



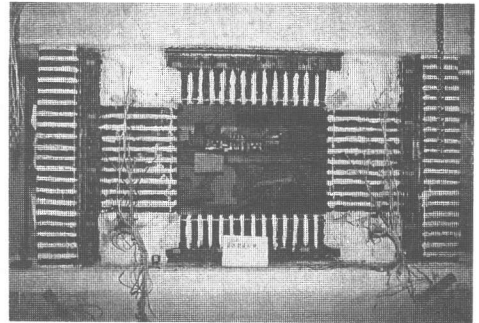
試験体 WA-04C-00



試験体 WA-04C-CW3



試験体 WA-04C-C3



試験体 WA-04C-C03

図-4 最終破壊状況

集中した。微小変形時に上下スタブ沿いに発生した曲げ亀裂が30度の角度で伸展し、 $R=5.0$ で開口部幅の中央縁に達し拡幅した。また柱中央高さから柱脚にかけ引張側柱主筋が引張降伏している。更に $R=10.0$ では前出の亀裂が全長にわたって(開口縁-スタブ沿い-壁板隅角部)拡幅し、開口上下の壁筋が降伏することで耐力に至った。その後開口隅角部周辺のコンクリートが圧壊・剥落、開口部下端高さから柱脚における柱曲げ亀裂が拡幅し徐々に耐力を失った。大変形時には両側柱頭柱脚の曲げ抵抗で水平力を負担していたと考えられる。

#### WA-04C-C03 (両側柱と開口周囲4方向補強)

WA-04C-C03は破壊が開口隅角部、開口横壁板部分(シート補強された部分を含む)に集中した。 $R=5.0$ で壁板中央の壁筋が降伏し、柱中央高さから柱脚にかけ引張側柱主筋が引張降伏している。同時に開口隅角部で圧壊を生じた。最大耐力を示した $R=10.0$ では開口隅角部に発生した亀

裂が顕著に拡幅した。特に圧縮側壁板の下部において45度に伸展していた亀裂が $hs=150$ で水平方向に伸展し、拡幅した。柱と壁が一体化し、回転したと考えられる。最大耐力以降剥落と、開口部下端高さから柱脚範囲の柱曲げ亀裂が拡幅、更に開口横壁板のCFシートで覆われたコンクリートがCFシート内部で圧壊し、徐々に耐力を失った。

#### 3.2 荷重変形関係

全せん断力 $Q$ と層間変形角 $R$ (柱内法スパンにおける層間変形角)との履歴曲線の包絡線を試験体相互に比較して図-5に示す。

初期剛性は補強を施すことによって上昇するが、3種の補強法による差異は小さい。いずれの試験体も、引張側壁板におけるせん断亀裂の発生に伴って剛性が低下し、圧縮側壁にもせん断亀裂が発生した時点で更に低下した。

正加力時の最大耐力は基準試験体 WA-04C-00と比較して、WA-04C-C3, WA-04C-CW3, WA-04C-C03

の順に 25%, 32%, 35% 上昇している。基準試験体では開口横両壁板の両側柱に伸展・貫通した  $R=5.0$  で脆性的に耐力を失った。しかし補強試験体はいずれもこの様に急激に耐力を失うことなく耐力を維持し、 $R=10.0$  で最大耐力に至った。但し WA-04C-C3 負加力時耐力のみが正加力時に比べて 15% 小さくなった。また各補強部位の CF シート歪も増大し有効に機能した。例えば WA-04C-C3 では耐力以降で柱の帯筋が降伏するがシート歪も増大し、最大で公称破断歪の 80% にまで達した。他の補強試験体でも CF シートは同様に機能している。 $R=15\sim 20$  で壁コンクリートの圧壊で耐力低下を生じるが、 $R=20$  以上の大変形時においては、柱のせん断破壊を防ぎ、最大耐力の 60% 程度 ( $\approx 300\text{kN}$ ) を維持し、軸耐力も失われていない。

### 3.3 変形成分比

試験体の変形を柱頭・柱脚部すべり変形、全体曲げ変形、全体せん断変形に分け、層間変位に対する割合を図-6 に示し、補強方法ごとに比較する。層間変形は加力スタブの水平変位である。すべり変形は引張柱柱頭と圧縮柱柱脚のそれぞれの上下スタブに対する相対水平変位を平均した値とした。また加力スタブの両柱上方位置で計測した変位を用いてスタブの回転角を算出し、曲げ変形による水平変形成分を求めた。せん断変形は層間変形からすべり変形と曲げ変形を引いたものとする。

開口左右の壁板に補強を施した試験体は 2 体共に  $R=10.0$  (最大耐力時) まで曲げ変形成分が増加し、それ以降急激に低下した。柱のみ補強した WA-04C-C3 と比較して最大耐力時の割合は 10% 程度大きく、補強した壁板のせん断剛性が增大し、相対的に曲げ変形が増加した。しかし最大耐力以降 WA-04C-C3 の曲げ変形成分比の低下率が最も小さい。すべり変形はいずれの試験体も耐力時 5% 程度であった。総じて補強試験体は最大耐力以降壁板の剛性が失われると共に、両柱の曲げ変形に移行し、 $R>20.0$  では 1 スパン架構のせん断変形が卓越した。

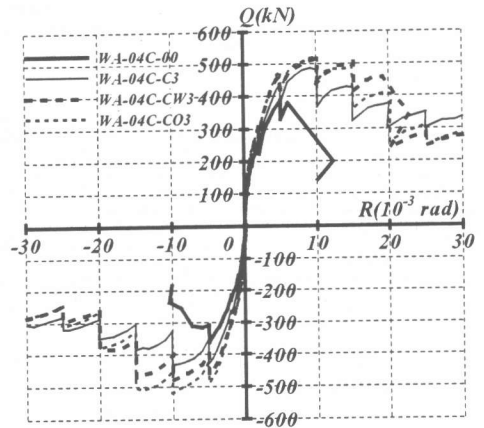


図-5 スケルトンカーブの比較

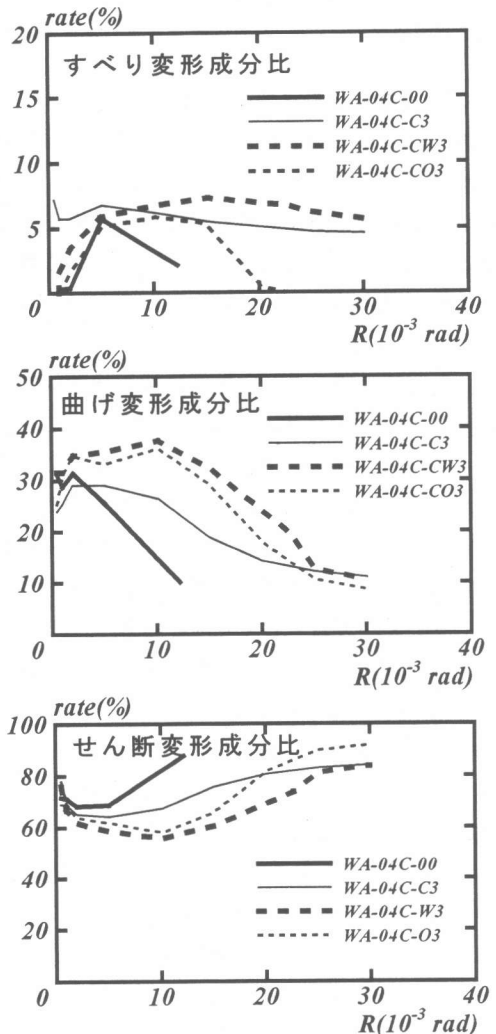


図-6 各変形成分割合の比較

表-4 実験値および計算値の比較

試験体	壁せん断初亀裂発生時				最大耐力時				限界変形時
	$R_{cr}$ ( $\times 10^{-3}$ rad)	$exp Q_{cr}$ (kN)	$cal Q_{cr}$ (kN)	$Q_{cr}$ exp/cal	$R_{max}$ ( $\times 10^{-3}$ rad)	$exp Q_{max}$ (kN)	$cal Q_{max}$ (kN)	$Q_{max}$ exp/cal	$R_u$ ( $\times 10^{-3}$ rad)
WA-04C-00	0.52	147	141	1.04	5.0	388	284	1.37	6.1
WA-04C-C3	0.72	165	148	1.11	9.2	486	303	1.60	20.0
WA-04C-CW3	1.23	245	142	1.73	10.1	515	483	1.07	19.1
WA-04C-CO3	0.83	182	142	1.28	10.2	523	483	1.08	19.1

$$cal Q_{cr} = \gamma \cdot \tau_c \cdot b_e \cdot j \quad \tau_c = 0.085 k_c (F_c + 500) / \{M / (Q \cdot D) + 1.7\} \quad (\text{kgf}) \quad (1)$$

$$cal Q_{max} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 180)}{\sqrt{M_i / (Q \cdot D) + 0.12}} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_y + \alpha \cdot \beta \cdot p_f \cdot \sigma_u + 0.1 \sigma_0} \right\} b_e \cdot j \cdot \gamma \quad (\text{kgf}) \quad (2)$$

$$p_f = a_f / \{b_e \cdot x_f\} \quad (3) \quad a_f: CF \text{ シート 1 層の断面積} = 0.111 \times 2 \times 3 \times 30 \text{ mm}^2 \quad x_f: CF \text{ シート補強間隔} = 50 \text{ mm}$$

$\alpha$ : シート補強効果低減率=2/3,  $\beta$ : 斜め亀裂に対して有効なシート断面積を求める係数=1/ $\sqrt{2}$ ,  $\gamma$ : 開口による強度低減率=0.6,  $p_f$ : シート補強量,  $\sigma_u$ : 炭素繊維シート公称破断強度=3480MPa \*他の記号については基準に従う

### 3.4 実験値と計算値の比較

表-4 にせん断初亀裂発生時、及び最大耐力時の水平力、層間変形角一覧を示す。ここでのせん断初亀裂は微小変形時における剛性低下の主たる原因となった開口横壁板における斜め亀裂をさす。初亀裂耐力  $cal Q_{cr}$  は荒川式(式(1))から、最大耐力  $cal Q_{max}$  は広沢式(式(2))から算出した。

初亀裂発生時耐力と実験値は開口横壁板部を補強していない2体の試験体に関して、よく適応している。壁板に補強を施した試験体に関しては30%~70%の差が生じ、発生時の層間変形角も大きい。CFシートにより見かけのひび割れ強度が増大し、他の相対的に弱い部分で亀裂が発生したことが理由として挙げられる。

最大耐力に関しては、いずれの試験体もAIJ-RC規準による強度低減率を乗じているが、無補強試験体は実験値を過小に評価している。側柱のみを補強した試験体 WA-04C-C3 は側柱の壁板変形拘束効果が耐力上昇の理由であり、式(2)の表現では評価できない。試験体 WA-04C-CW3, WA-04C-CO3 を評価する際、特に耐力増大に寄与したと考えられる開口横壁板補強に用いたCFシートの補強効果を式(3)によって壁筋と同様に評価し算出した。その結果実験値と計算値は良い対応を示した。

### 3.5 限界変形角

構造部材の変形性能を示す指標である限界部材角を最大耐力の80%に低下した時点での部材角<sup>3)</sup>とし、包絡線から読み取り表-4に記載した。基準試験体は部材変形角1/200で耐力を急激に失ったが、補強を施した試験体はいずれも1/100での最大耐力以降、耐力を維持し、限界変形角は1/50であった。本報の補強によって脆性的な破壊を回避することができる。

## 4. 結語

本研究では炭素繊維シートおよび鋼材を用いてせん断補強した窓開口付きRC造耐震壁の実験的検討を行い、以下のような知見が得られた。

- 1) せん断補強筋が不足する付帯柱のみをせん断補強することによっても耐力・変形性能共に向上させることができる。
- 2) 柱補強に加えて窓開口部の左右又は上下の壁を補強することによって最大耐力低下を更に減少させることができる。

【謝辞】本研究の遂行にあたり東燃(株)より材料及び研究費の補助を得た。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, 1962, 2) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999, 3) 日本防災協会編, 既存鉄筋コンクリート構造建築物の耐震診断規準・同解説, 1990