

論文 炭素繊維シート及びグリッドを用いた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

手塚 慎一^{*1}・北野 敦則^{*2}・後藤 康明^{*3}・城 攻^{*4}

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）と炭素繊維グリッド（以下 CF グリッド）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壁の CF グリッド補強により耐力及び変形性能が向上した。また，開口端上下に縦スリットを設け，袖壁と柱を CF シート補強することにより，変形性能が大きく向上した。補強方法の異なる試験体の終局曲げ耐力・終局せん断耐力を，破壊モードと対応する形で概ね評価することができた。

キーワード：RC 造有開口耐震壁，CF シート，CF グリッド，スリット，補強効果

1. はじめに

地震力作用時において RC 耐震壁は，その高剛性のために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。これまで筆者らは，1971 年以前の旧建築基

準法で設計されたせん断耐力の低い柱に挟まれた窓又は通路開口付き耐震壁を対象試験体とし，開口を利用した CF シート補強により，補強効果が期待できる可能性を示してきた。今年度は，新しい補強材の CF グリッドを用いた壁の補強，中央窓開口端上下の縦スリットを利用した CF シート補強について検討を加える。その上で周辺部材を含め，強度・靱性共に優れた補強方法の提案を目的としている。

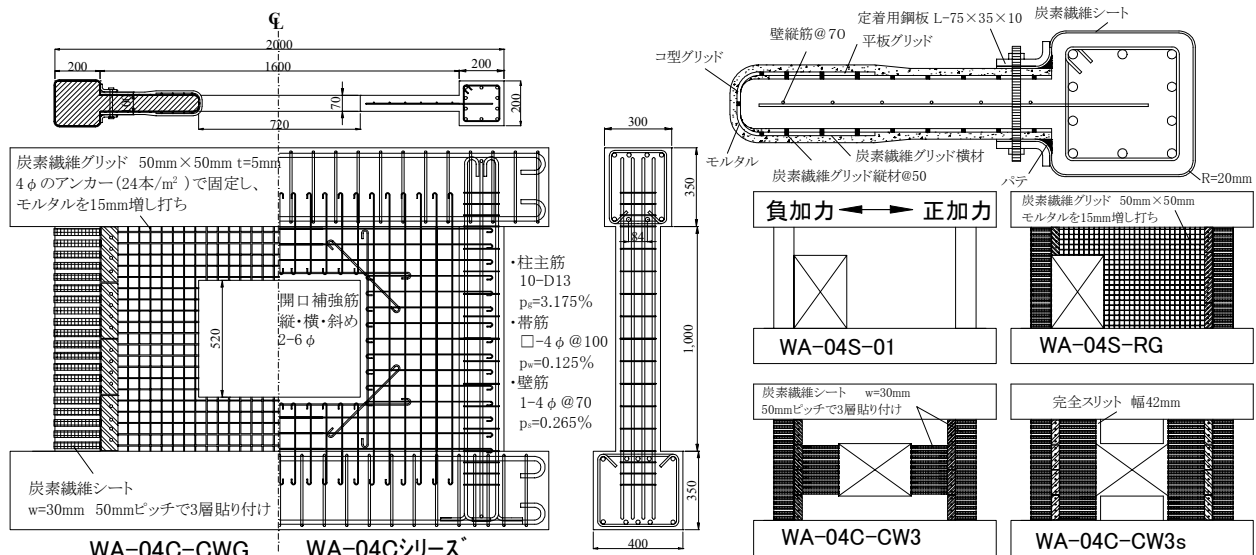


図 - 1 試験体形状・配筋図

*1 三井住友建設（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、約 1/3 の縮小模型を計 9 体作製した（試験種目では 10 体分）。

このうち、窓開口を壁中央に持つ試験体 4 体と、通路開口（縦型開口）が柱脇に偏在した試験体の 2 体の計 6 体は過年度に報告¹⁾している。今年度の試験体は、偏在通路開口の無補強試験体 WA-04S-01（以下 S-01）、S-01 を $R = 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで水平加力した後補修し、柱を CF シート、壁を CF グリッドで補強した WA-04S-RG（以下 S-RG）、S-RG と同様の補強をした中央窓開口補強試験体 WA-04C-CWG（以下 C-CWG）、開口端上下に縦スリットを設け、袖壁及柱を CF シート補強した試験体 WA-04C-CW3s（C-CW3s）の計 4 体である。

壁板は厚さ 70mm、内法寸法 $1,000 \times 1,600 \text{mm}^2$ 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²⁾）に準拠）によって補強されている。両側柱の断面は、 $200 \times 200 \text{mm}^2$ で内法高さは 1,000mm である。

配筋は、柱主筋は 10-D13（SD345）、帯筋は $4\phi @ 200$ （SR295 相当）、壁筋は縦横共に $4\phi @ 70$ （SR295 相当、C-CWG のみ SR345 相当）を等間隔に配筋した。開口補強筋は縦横斜め共に 2-6 ϕ （SR295 相当）とした。

S-RG の補修方法は、損傷の大きい剥落部にセメント系断面修復剤で補修を行い、エポキシ系樹脂で亀裂補修を行った。S-RG と C-CWG の補強に用いた壁の CF グリッドは、約 5mm 幅の CF シートを樹脂に含浸させながら縦横格子状に交互に重ねて、厚さが約 5mm となるように一体成形したものでグリッドの 1 マスが $50 \text{mm} \times 50 \text{mm}$ である。補強方法は、まず既存壁と増打モルタルとの付着力確保のため表面をブラスト処理し、CF グリッドを径 4ϕ の鋼製アンカー（約 200mm ピッチ）で既設壁面に固定し、モルタル

表 - 1 試験体一覧

試験体名	開口位置・用途 開口寸法 高さ×幅	補強方法	σ_B (MPa)
WA-04S-01		—	17.5
WA-04S-R*	下部柱脇に偏在・通路 520×720(mm)	補修後、柱シート	25.5
WA-04S-CW3*		柱・袖壁シート	23.5
WA-04S-RG		補修後、柱シート+壁グリッド	21.8
WA-04C-00*	上下左右の中央・窓 720×520(mm)	—	21.3
WA-04C-C3*		柱シート	24.6
WA-04C-CW3*		柱・袖壁シート	21.8
WA-04C-CO3*		柱・袖壁・垂壁・腰壁シート	22.6
WA-04C-CWG		柱シート+壁グリッド	21.5
WA-04C-CW3s		スリット+柱・袖壁シート	22.1

σ_B : コンクリート圧縮強度

*は過年度試験体

表 - 2 材料の力学的性状

鉄筋	鋼種	降伏強度 (MPa)	降伏歪み (μ)	ヤング係数 (GPa)	伸び率 (%)
主筋 D13	SD345	399	2020	194	20.3
帯筋・壁筋 4 ϕ	SR295相当	393	1990	195	24.2
壁筋(C-CWG) 4 ϕ	SR345相当	529	4780	189	9.7
開口補強筋 6 ϕ	SR295相当	357	1760	201	20.8
CFRP	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	破断伸び (%)	設計厚さ (mm)	断面積/本 (mm^2)
炭素繊維シート*	3480	230	1.5	0.111	—
炭素繊維グリッド*	1400	100	1.5	—	26.4
増打モルタル	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	付着強度 (MPa)	ヤング係数 1/3(GPa)	ヤング係数 2/3(GPa)
S-RG	36.6	9.18	1.88	11.4	10.2
C-CWG	46.5	9.06	1.94	11.0	9.9

*は全てカタログ値

を片面 15mm 厚で吹き付け仕上げた。CF グリッド補強後の壁厚は 100mm となる。CF シート補強方法は、表面のケレンとコーナー部（ $R=20 \text{mm}$ ）を面取りした後、エポキシ系下地剤を塗布し、硬化後に幅 30mm の CF シートをエポキシ系樹脂を用いて 50mm 間隔で 3 層に貼り付けた。20mm の隙間は観察のために設けたもので、実用時には全面補強とする。CF シートの定着は L 型鋼（ $35 \times 75 \times 10$ 、外法半径 20mm）と M12 高力ボルト（@50mm）を用い壁端で固定した。C-CW3s は中央窓開口端上下に縦スリットを設け、腰壁・垂壁を完全に分離し柱と袖壁を CF シート補強した。

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 層応力状態を再現するために、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水平加力を行った。軸力は、柱軸力比 $\sigma_0/\sigma_B=1/6$ 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 ± 1 回、 $R=1, 2, 5, 10, 15, 20, 25$ で各 ± 2

回繰返し加力を行った後、破壊状況を見て $R=30$,
35 , 40 で (各 ± 1 回) まで加力した。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊状況

図 - 2 に載荷装置と各部呼び名および最終破壊状況を , 図 - 3 に補強試験体の終局時 ($R=30.0$) における試験体全体変形図を示す。

S-01 (正加力時): $R=5.1$ で袖壁と圧縮柱下部のせん断亀裂が拡幅し , この亀裂発生位置近傍の壁横筋及び柱帯筋が降伏して , 最大耐力に達した直後に , 同部位がせん断破壊し急激に耐力が低下した。

S-01 (負加力時): 袖壁全体にせん断亀裂が多数発生して $R=8.3$ で最大耐力に達し , これらの亀裂の拡幅で耐力が低下した。圧縮側独立柱下部でせん断亀裂が拡幅し , 最大耐力時に帯筋降伏が見られた。

S-RG (正加力時): 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壁縦筋が降伏した。圧縮側柱脚付近を中心に曲げ回転し , 耐力が頭打ちになり , $R=19.3$

で最大耐力に達した。最大耐力後 , 圧縮側柱下部が圧壊し , 袖壁と圧縮側柱の脚部が加力方向に滑り出して耐力が低下した。

S-RG (負加力時): $R=5.1$ で引張側柱の主筋が降伏し最大耐力に達した。正加力時に開いた袖壁下スタブ沿いの曲げ亀裂の影響で , 引張柱と袖壁の境界部が開き始め , 袖壁全体が加力方向に滑り出し耐力が低下した。この影響で , 引張柱下部の CF シートが破断して , 引張柱下部も袖壁と同様に加力方向に滑り出し耐力低下が大きくなった。

C-CWG (正負共通): $R=5.0$ で引張側柱下部の主筋が降伏し剛性低下した。上下スタブ沿いの曲げ亀裂が拡幅し , 壁縦筋の歪み度が増大して , $R=14.1$ で最大耐力に達した。その後 , 圧縮を受ける開口隅角部近傍のコンクリートが圧壊し , 独立した袖壁付柱として曲げ変形した。この圧壊の進行と共に耐力が低下した。また , $R=20.0$ より , 上下スタブ沿い曲げ亀裂の影響で圧縮側柱と壁が一体となり加力方向に滑り始めた。

C-CW3s (正負共通): 引張側袖壁上スタブ沿いと圧縮側袖壁下スタブ沿いの曲げ亀裂が拡幅し ,

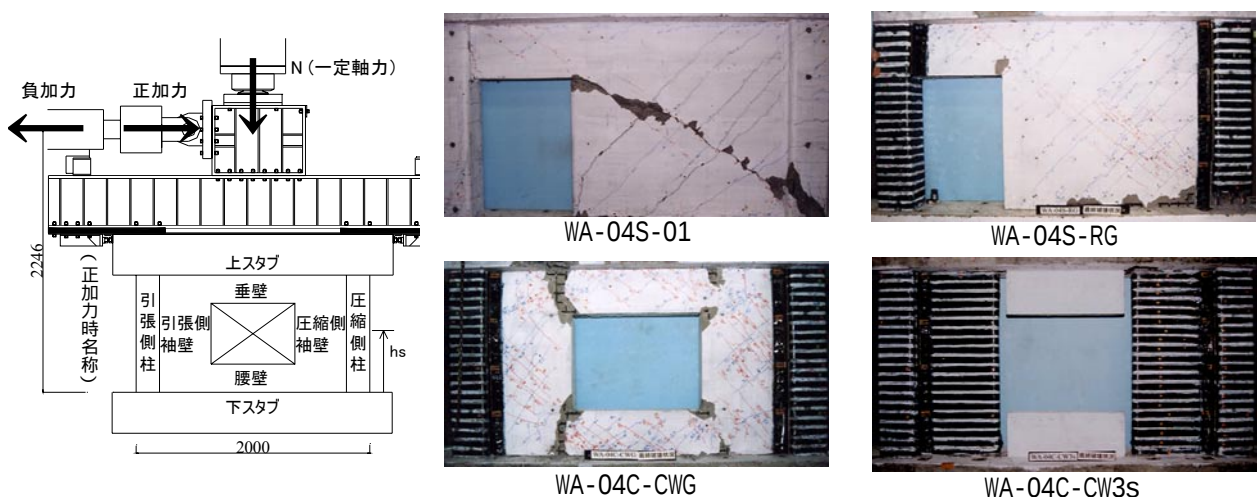


図 - 2 載荷装置と各部呼び名および最終破壊状況

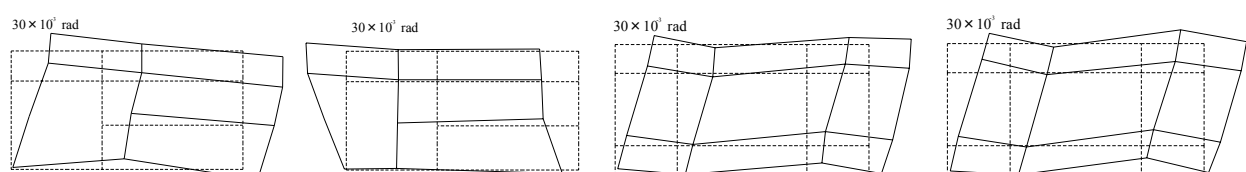


図 - 3 試験体全体変形 ($R = 30.0 \text{ rad} \times 10^{-3}$)

柱と袖壁が一体となる袖壁付柱として曲げ変形し、 $R=15.2$ で最大耐力に達した。その後、上下スタブ沿いの袖壁が圧壊し、徐々に耐力低下した。

3.2 荷重変形関係

図 - 4 に包絡線の比較を示す。

(1) 偏在通路開口壁の補強効果

初期剛性は、補修試験体 S-RG と S-R の剛性が低くなるが、顕著な違いは見られなかった。

正負加力時共に最大耐力は、無補強試験体 S-01 に比べて補修の有無に関わらず、補強試験体が高い。これより、綿密に補修を行えば柱の CF シート補強により、柱の早期せん断破壊を防ぎ、耐力が上昇するといえる。

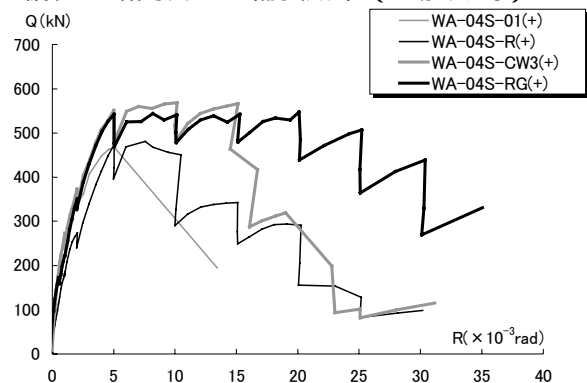
正加力時において S-RG と S-R を比較すると、S-R は袖壁のせん断破壊により $R=10.0$ で耐力が低下するのに対し、S-RG は大変形時まで高い耐力を維持した。これは、S-RG が壁の CF グリッド補強により袖壁のせん断亀裂拡幅を防ぎ、剛性を高めたために、圧縮側柱脚付近を中心に耐震壁架構全体で曲げ変形した影響である。また、S-RG と S-CW3 を比較すると、S-CW3 は $R=15.0$ で圧縮柱下部が曲げ圧壊し、曲げ降伏を維持できずに急激に耐力低下を起こすのに対し、S-RG は $R=25.0$ で柱下部の曲げ圧壊による耐力低下が小さい。これは CF グリッド補強時のモルタル増し打ちの効果で、袖壁の曲げ圧縮力負担割合が増大したためである。

負加力時においては、正加力時と比較して、無補強試験体に対する補強試験体の耐力上昇が少なかった。これは、S-R は袖壁対角線上のせん断亀裂に沿って、S-CW3 と S-RG は袖壁全体が柱と壁の境界で分かれて、開口側に滑り出しが生じるためである。特に、S-RG と S-CW3 は壁の滑り出しの影響で、柱 CF シートが破断して、柱の滑り出しが生じるため、滑りに対する補強方法の改善が今後の課題である。

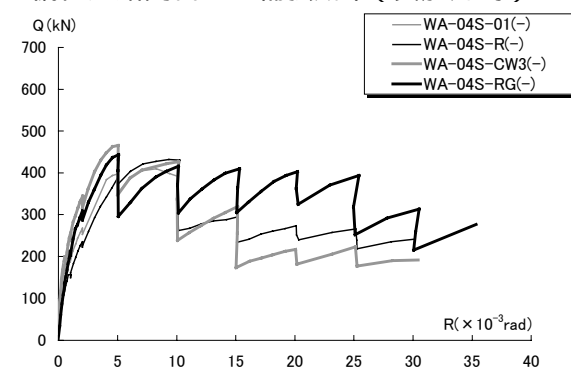
(2) 中央窓開口壁の補強効果

初期剛性は、C-CW3s がスリットによって壁が二分され、壁対角線上の圧縮ストラットが形成されなくなるため最も低かった。C-C3 に対し、

偏在通路開口壁の補強効果（正加力時）



偏在通路開口壁の補強効果（負加力時）



中央窓開口壁の補強効果

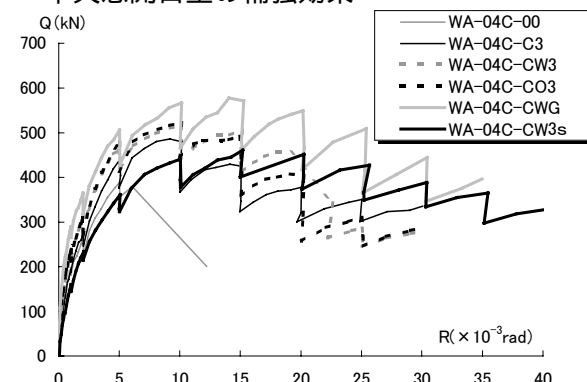


図 - 4 層せん断力 Q -層間変形角 R の包絡線比較

C-CW3 と C-CO3 は、補強部でのせん断亀裂拡幅は防がれるが、補強部外でのせん断破壊が進行するため、耐力・変形性能に大きな改善が見られなかった。C-CWG は壁面全体を CF グリッドにより補強し、壁面でのせん断亀裂拡幅が防止されたため、曲げ破壊モードへ移行し、最大耐力で 18.9% の上昇が見られ、大変形時においても高い耐力を維持し、変形性能の改善が見られた。また C-CW3s は、他の補強試験体と比較すると、最大耐力は低下するが、開口端上下のスリットにより、袖壁と柱が一体となって曲げ変形した

ため、R=25.0 では C-CWG に次いで耐力が高く、大変形時の変形性能は最もよかった。

3.3 実験値と計算値の最大耐力の比較

表 - 3 に最大耐力時の水平力と層間変形角を計算値と併せて示す。

(1) RC 造耐震壁の終局曲げ耐力 BQ

BQ は、耐震壁の全体終局曲げ耐力 3BQ_w と袖壁付き柱の累加曲げ耐力 BQ_{cw} の最小値として式 (1) のように定義した。

$$BQ = \min. [BQ_w, BQ_{cw}] \quad (1)$$

BQ_{cw} は、図 - 5 に示すように、柱が取り付けしていない側に、柱幅が壁厚と等しく、柱せいが反対側柱せいと等しい仮想柱を設けることとし、

式 (3) を用いて算定した。また、袖壁付柱の反曲点高さは、袖壁付き柱及び垂壁付き梁のフレームからなる門型フレームを想定し、その剛比により D 値法における反曲点高さとして算定した。ただし、スリット無しの中央窓開口試験体に対しては、腰壁の影響による高さ方向の剛域を考慮して反曲点高さを低減した。

(2) 広沢修正式に基づくせん断耐力 sQ_h

sQ_h は開口低減率 r を乗じてせん断耐力を求めるが、ここで r を開口が圧縮対角ストラットに占める面積から、図 - 6 に示すように算定した。今年度の CF グリッド補強試験体 S-RG と C-CWG は、CF グリッドによりトラス機構におけ

表 - 3 最大耐力時の実験値と計算値一覧

試験体名	σ_B (MPa)	r	Q_{exp} (kN)	R ($\times 10^{-3}$ rad)	BQ_w (kN)	BQ_{cw} (kN)	BQ (kN)	sQ_h (kN)	sQ (kN)	Q_{cal1} (kN)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal1}}$	Q_{cal2} (kN)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal2}}$	破壊モード
WA-04S-01(+)	17.5	0.86	467	5.1	500	580	500	383	402	383	1.22	402	1.16	柱・袖壁せん断破壊
WA-04S-01(-)		0.76	410	8.3	522	506	506	339	341	339	1.21	341	1.20	袖壁せん断破壊
WA-04S-R(+)	25.5	0.86	481	7.6	553	636	553	451	553	451	1.07	553	0.87	袖壁せん断破壊
WA-04S-R(-)		0.76	432	9.3	555	566	555	399	488	399	1.08	488	0.88	袖壁せん断破壊
WA-04S-CW3(+)	23.5	0.86	568	10.2	533	692	533	710	644	533	1.07	533	1.07	壁全体曲げ破壊
WA-04S-CW3(-)		0.76	466	5.1	544	507	507	627	547	507	0.92	507	0.92	柱降伏後の壁脚部滑り破壊
WA-04S-RG(+)	21.8	0.86	547	19.3	523	651	523	835	721	523	1.05	523	1.05	壁全体曲げ破壊
WA-04S-RG(-)		0.76	443	5.1	545	515	515	738	596	515	0.86	515	0.86	柱降伏後の壁脚部滑り破壊
WA-04C-00(+)	21.3	0.59	389	5.0	534	562	534	285	353	285	1.36	353	1.10	柱・袖壁せん断破壊
WA-04C-C3(+)	24.6	0.59	486	9.2	551	581	551	304	476	304	1.60	476	1.02	袖壁せん断破壊
WA-04C-CW3(+)	21.8	0.59	516	10.1	537	565	537	477	512	477	1.08	512	1.01	垂壁圧壊・せん断破壊
WA-04C-CO3(+)	22.6	0.59	523	10.2	541	569	541	482	519	482	1.09	519	1.01	袖壁せん断破壊
WA-04C-CWG(+)	21.5	0.59	578	14.1	543	571	543	587	552	543	1.06	543	1.06	壁全体曲げ破壊
WA-04C-CW3s(+)	22.1	0.59	461	15.2	538	479	479	479	515	479	0.96	479	0.96	袖壁付柱曲げ破壊
$Q_{cal1} = \min. [sQ_h, BQ], Q_{cal2} = \min. [sQ, BQ]$									平均		1.12		1.01	■ sQ の値を採用
									標準偏差		0.19		0.11	

RC 造耐震壁の全体終局曲げ耐力式

$$BQ_w = \frac{M_u}{h} \quad M_u = a_t \cdot \sigma_y \cdot l_w + \beta \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot l_w + 0.5N \cdot l_w$$

RC 造袖壁付柱の累加終局曲げ耐力式

$$BQ_{cw} = \sum BQ_{cw}' \text{ (中央窓開口)}, BQ_{cw} + BQ_c \text{ (偏在通路開口)}$$

$$BQ_{cw} = \frac{M_u}{h_{cw}} \quad M_u = a_t' \cdot \sigma_y \cdot l_w + 0.5 \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot l_w + 0.5N_e \cdot l_w$$

広沢修正式に基づく補強 RC 耐震壁の終局せん断耐力式

$$sQ_h = r \cdot \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (\sigma_B + 17.7)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{sy} + \alpha \cdot p_{wf} \cdot \sigma_f + 0.1 \sigma_0} \right\} b_e \cdot j \quad (4)$$

β : 開口位置によって変化する係数, h_{cw} : 袖壁付柱の反曲点高さ (mm),
 a_t' : 仮想柱の全鉄筋断面積 (mm^2), N_e : 変動軸力を考慮した軸力 (N)
 p_{wf} : b_e を壁厚と考えた場合の CF グリッド及び CF シート補強比 ($= a_f/b_e \cdot x_f$)
 x_f : CF グリッド及び CF シートの補強間隔 (mm)
 a_f : CF グリッド断面積 ($= 26.4 \times 2 = 52.8 \text{mm}^2$) 及び CF シート断面積 ($0.111 \times 2 \times 3 \times 30 = 19.98 \text{mm}^2$)
 σ_f : CF グリッド及び CF シートの破断強度 (MPa) (カタログ値)
 σ_B : グリッド補強試験体の場合、既存壁とモルタル増打部の断面積比に応じたコンクリート強度 (MPa)
 r : 図 - 6 で定義される開口低減率 (開口位置で異なる)

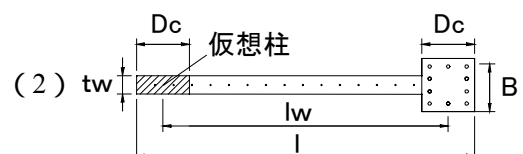


図 - 5 袖壁付柱の断面諸元

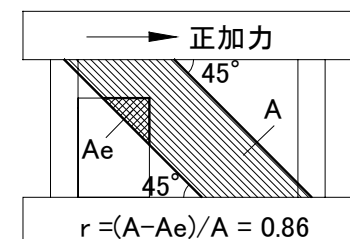


図 - 6 開口低減率算定法

他の記号は各文献参照

るせん断耐力増大に加え、CF グリッド補強時のモルタル増し打ちによりアーチ機構によるせん断耐力が増大したため、曲げ破壊モードに至ったと考えられる。そこで、コンクリートの圧縮強度を既存壁部とモルタル増し打ち部の断面積比に応じた平均圧縮強度として、アーチ機構によるせん断耐力増大分を式(4)に算入した。

(3)各部耐力累加式によるせん断耐力 sQ

各試験体の補強部位・補強方法・破壊形式に算定式を対応させるため、 sQ を以下のように定義し、図-7に Q と部位との関係を示す。

sQ ：各部の終局耐力最小値の累加 (5)

中央 $sQ = [sQ_c + sQ_w]_{引張} + \min.[pQ_c + sQ_w, sQ_c + sQ_w]_{圧縮}$
 偏在 $sQ = \min.[sQ_c + sQ_w, (pQ_c + sQ_w)]_{袖壁付柱}$

$+ \min.[BQ_c, sQ_c]_{独立柱}$ ()内は正加力時のみ使用

sQ_c ：広沢修正式⁴⁾に基づく補強柱のせん断耐力

sQ_w ：柱なし壁のせん断耐力³⁾に基づく補強式

$sQ_w = \left\{ \sigma_B / 20 + 0.5(p_s \cdot \sigma_{sy} + \alpha \cdot p_f \cdot \sigma_f) \right\} \cdot t_w \cdot l_w$ (6)

α ：最大耐力時壁シート歪み実測値より 1/10 と仮定

pQ_c ：側柱のパンチングシア耐力³⁾

$pQ_c = K_{\min} \cdot \tau_0 \cdot b_e \cdot D$ (7)

BQ_c ：独立柱の曲げ耐力⁴⁾

記号は各文献を参照

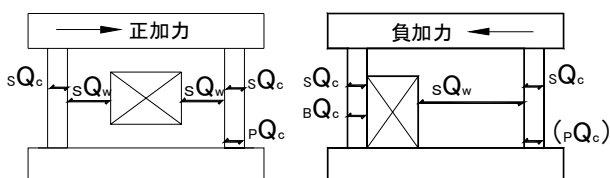


図-7 Q と部位との関係

(4)算定結果

各試験体の計算値耐力 Q_{cal1} と Q_{cal2} を以下のように定義した。

$Q_{cal1} = \min.[BQ, sQ_h], Q_{cal2} = \min.[BQ, sQ]$ (8)

式(8)を用いて定まる計算値破壊モードは、

$Q_{cal1} \cdot Q_{cal2}$ 共に、実験値破壊モードと対応する形で評価することができた。

曲げ破壊型の試験体は式(1)により概ね耐力を、評価することができた。スリットを有する C-CW3s はその破壊形式より式(3)との対応がよい。せん断破壊型の試験体は、式(4)により

せん断耐力を算定した場合、柱の CF シート補強効果を算入する事ができないため、C-C3 との対応がよい。一方、式(5)によりせん断耐力を算定した場合、補強部位が異なることによる耐力の増大が評価され、よい対応を示した。

4. 結語

せん断耐力の低い柱に挟まれた窓又は通路開口付き耐震壁の CF シート及び CF グリッドを用いた、補強効果は次のようにまとめられる。

1. 開口位置に関わらず、壁全面を CF グリッド補強することで、壁のせん断亀裂拡幅が防止され、曲げ破壊モードへ移行するため、耐力及び変形性能が向上する。
2. 開口端上下に縦スリットを設け、CF シート補強を行った場合、剛性・耐力は共に低下するが、2つの袖壁付柱として曲げ変形が卓越するため、変形性能が大きく向上する。
3. 終局曲げ耐力は、耐震壁全体曲げ耐力と袖壁付き柱の累加曲げ耐力の最小値によって評価することができる。
4. せん断終局耐力の評価は、各部の終局耐力最小値の累加方式により、各部の補強効果も含めて評価することができる。

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) 松裏眞佐代ほか：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，コンクリート工学，Vol.24，No.2，pp.1249-1254，2002.6
- 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) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説，2001
- 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