

## 論文 既存壁式構造における新設開口の補強に関する研究

山崎 智博<sup>\*1</sup>・張 彦龍<sup>\*2</sup>・田才 晃<sup>\*3</sup>・加藤 博人<sup>\*4</sup>

**要旨**：リニューアル工事で既存壁に開口を新設する場合の開口の影響及び開口補強方法を検討することを目的として、鉄筋コンクリート造壁の静的加力実験を行った。補強方法は通常の開口補強筋、炭素繊維シート貼り付け、および鋼材の設置の3種類とした。開口を新設することにより、破壊形式が曲げからせん断に変化し、最大せん断応力度レベルは、やや低下した。開口周囲の補強方法の違いによる耐力の改善効果はあまり顕著ではなかったが、鋼材を用いた補強方法では無補強の場合に比べ2割程度の耐力増加がみられ、最大耐力以降急激な耐力低下は生じなかった。

**キーワード**：新設壁開口、開口補強、炭素繊維シート、溝形鋼

## 1. はじめに

建築ストックの増加や資源の有効活用の観点から、既存建築物のリニューアルが着目されている。集合住宅のリニューアルでは、住戸面積を拡大して現在のニーズに応えるために、壁に新たな開口を設ける方法が考えられる。開口のある鉄筋コンクリート造壁の設計では、開口周囲の縁応力に抵抗するための補強筋を配することが規定されているが、既存の壁に新たな開口を設ける場合は、コンクリートに開口補強筋を埋設することは一般に困難であり、それに代わる有効な補強方法の開発、検証が求められる。

そこで本研究では、壁式構造の既存集合住宅における戸境の耐力壁に人通開口を設けることを想定し、開口の有無と補強方法を変動要因とした静的水平加力実験を行い、地震時における壁の強度、破壊性状等に及ぼす開口の影響と補強効果の検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

既存プロトタイプ建物として、建設から30

年以上経過した実在する標準的な鉄筋コンクリート造壁式構造集合住宅を選び、その低層階の戸境に設けられた耐力壁1層分を1/2に縮小したものを試験体とした。試験体数は全5体で、扉を設けることを想定した開口の有無および補強方法を変動要因とした。

試験体諸元を表-1に、試験体配筋図を図-1に、材料特性を表-2に示す。どの試験体も、両側に柱のない内法高さ1220mm、長さ1835mm、厚さ90mmの1枚壁とし、壁の上下に加力用スタブを設けた。壁筋はプロトタイプ建物の壁筋比 $p_w=0.22\%$ と同量となるよう縦横筋とも $4\phi @125$ ダブルとした。プロトタイプの壁の両端に存在する直交壁が耐力に及ぼす効果を取り入れるために壁両端部に補強筋D13をそれぞれ4本配筋した。

試験体No.5は開口を新設する前の耐力壁の性状を見るもので、No.1は開口を新設するのみで開口周囲の補強を行わない場合の性状を調べる目的の試験体である。その他の3体は後述の開口補強を行なった。開口の位置と大きさは、壁中央部に高さ1000mm、幅500mmとした。等価

\*1 横浜国立大学大学院 社会空間システム学専攻 (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 社会空間システム学専攻

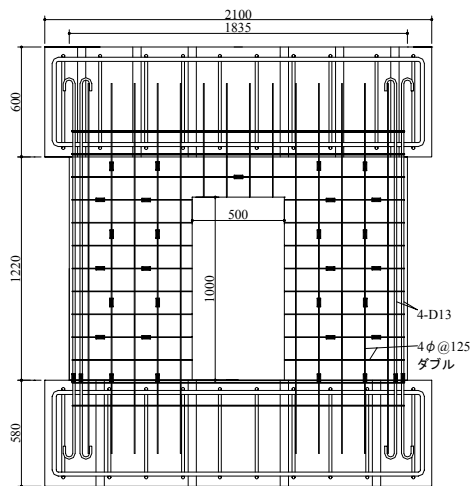
\*3 横浜国立大学大学院 助教授 システムの創生部門 人の空間のシステム分野 (正会員)

\*4 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 (正会員)

表－１ 試験体諸元

試験体名	壁長 l(mm)	壁高 h(mm)	壁厚 (mm)	開口形状 $h_0 \times l_0$ (mm)	壁筋	壁筋比 $P_s(\%)$	端部補強筋	$F_c^{※1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	開口の有無	補強方法
NO.1	1835	1220	90	1000×500 開口周比 0.47 <sup>※2</sup>	4φ@125 ダブル (SR235)	0.22	4-D13 (SD345)	18.0	有	(無補強)
NO.2									有	基準 <sup>1)</sup> による開口補強
NO.3									有	炭素繊維シート貼付
NO.4									有	溝型鋼設置
NO.5									無	

※1 プロトタイプ建物のコンクリート設計基準強度 ※2  $\sqrt{(h_0 l_0 / h l)}$



図－１ 試験体配筋図

表－２ 材料特性

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
実験日コンクリート 圧縮強度(MPa)	25.2	25.6	27.0	27.4	23.6
鉄筋種	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪 (%)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断歪 (%)
4φ	189000	509.8	0.473	562.4	8.4
D13	178000	379.1	0.344	579.5	15.9

表－３ 補強材料の材料特性（試験値）

補強材料	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪 (%)
9φ 開口補強筋	196000	336.5	0.166
13φ 鋼材補強壁定着筋	206000	326.7	0.160
D6 スタッド	204000	368.4	0.382
D16 鋼材補強下部アンカー	191000	374.4	0.257
	強化繊維目付 (g/m <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
炭素繊維シート	305	3436	248000

開口周比<sup>1)</sup>は0.47である。

コンクリートは、試験体を立てた状態で上方から打設した。開口のある試験体は、開口とってから打設した。開口のある試験体は、開口となる部分に発砲スチロールをあらかじめ充填した状態で打設した。

## 2.2 補強方法

試験体 No.2, No.3, および No.4 の補強詳細を図－２に、補強材材料特性を表－３に示す。

### 1) 通常の開口補強[No.2]

開口が当初から存在するものとして、RC 規準<sup>1)</sup>に従った開口補強を施した。開口補強筋には9φを用いた。試験体 No.3, No.4 における開口補強の効果を判断する基準とした試験体である。

### 2) 炭素繊維シート貼付けによる補強[No.3]

壁両面の開口部周辺に炭素繊維シートをエポキシ樹脂により接着した。必要シート量は No.2 と同等の補強量となるよう建築学会の指針案<sup>2)</sup>に従って求めた。シート幅は、水平方向は幅150mm、鉛直方向は100mmとし、開口上部の付着長は水平方向に300mm、鉛直方向に220mmとした。簡便な補強と位置付けし、開口周辺における壁筋の定着処置は行わず、開口下部におけるシートの定着も取って行わなかった。

### 3) 鋼材による補強[No.4]

溝形鋼 100×50×5×7.5 で開口補強したもので壁筋の定着および補強鋼材の定着を考慮した。溝形鋼ウェブに壁筋と同じ間隔で異形棒鋼スタッドD6を溶接し、これらを壁筋とフレア溶接することにより壁筋の定着を確保した。また開口下部のコンクリートに接着系アンカーD16を設

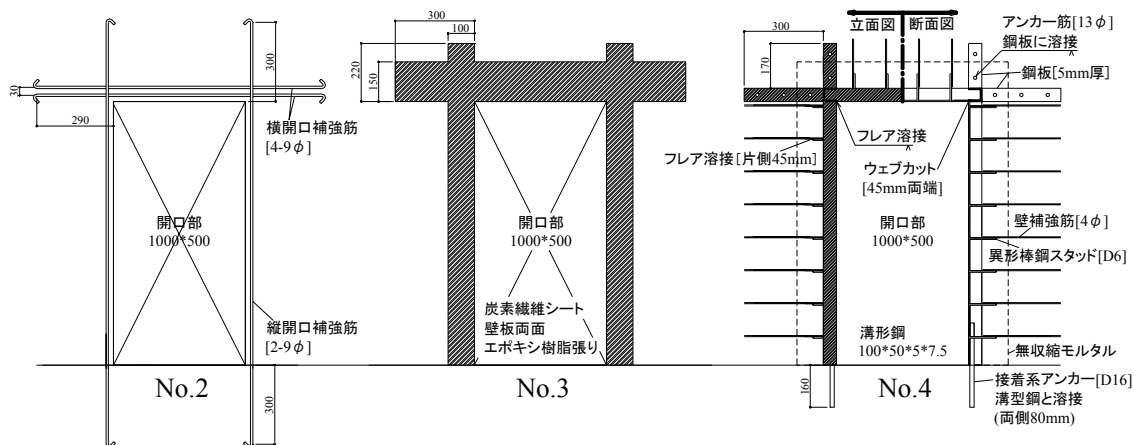


図-2 開口補強詳細図

置し、これを溝形鋼ウェブに溶接することにより補強下部の定着をとった。さらに開口上部では溝形鋼フランジに鋼板を溶接することにより壁体部に延長し、これに壁板を貫通させたアンカー筋 13φを溶接して補強上部の定着を図った。鋼板およびアンカー筋と壁コンクリートとの隙間にはエポキシ樹脂を注入して一体化した。以上の補強を実施するために開口周辺の壁板コンクリートを予め研り取ることを想定し、試験体の開口は大きめに開けておき、最後に開口周辺部に無収縮モルタルを充填した。

### 2.3 加力方法及び計測方法

加力は図-3に示す装置により、地震力を想定した静的正負繰返し水平加力とした。軸力は2本の鉛直油圧ジャッキにより一定に制御し、その大きさは既存プロトタイプ建物の下層階の値を参照して、コンクリート設計基準強度に対して軸力比 0.1 となる 300kN とした。水平力は加力ビームを介して壁頂部に作用させた。載荷履歴は、層間変形角を R とし、振幅が  $R = \pm 1/2500\text{rad}$ ,  $\pm 1/1500\text{rad}$ ,  $\pm 1/800\text{rad}$ ,  $\pm 1/400\text{rad}$ ,  $\pm 1/200\text{rad}$ ,

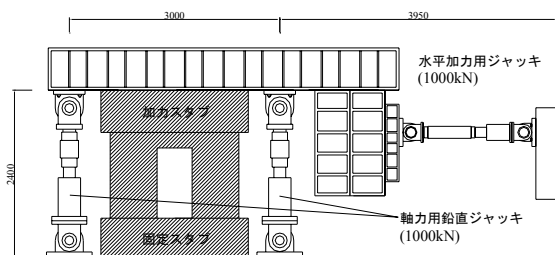


図-3 加力装置図

$\pm 1/100\text{rad}$ ,  $\pm 1/50\text{rad}$  となるよう 1 ないし 2 回の漸増正負繰返しとした。

計測項目は、水平荷重、水平変形、鉛直変位、全体および部分の曲げとせん断変形、鉄筋および補強材の歪とした。

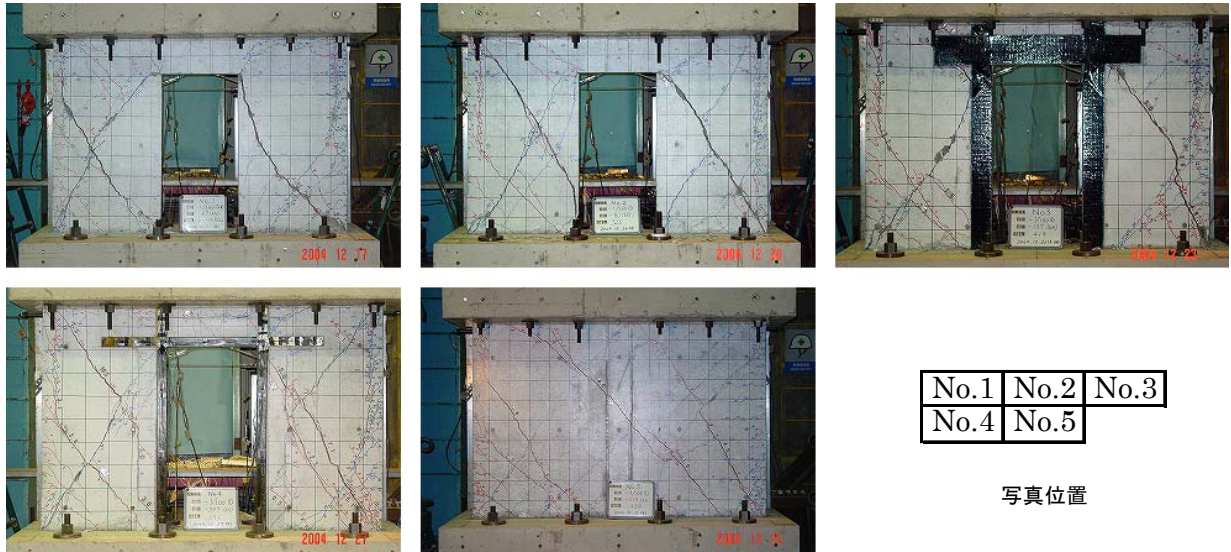
## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

各試験体の  $R = -1/100(\text{rad})$  のサイクル終了時の破壊状況写真を写真-1に示す。以下各試験体の損傷の進展について述べる。

開口のない No.5 では、初期ひび割れとして  $R = -1/2500(\text{rad})$  のサイクルで壁の中央高さより下部に引張側からの斜めひび割れが複数発生した。 $R = \pm 1/400(\text{rad})$  で壁中央部に上下スタブ間を結ぶ斜めひび割れが発生し、以降変形の増加とともに壁板全体に斜めひび割れの数と幅が増加した。 $R = +1/50(\text{rad})$  の正方向加力中に圧縮側やや下部のコンクリートがせん断圧縮破壊し耐力低下した。

開口無補強の No.1 では、層間変形角  $R = \pm 1/2500(\text{rad})$  のサイクルで、開口右隅角部に斜めひび割れ、左右の壁下方に引張側からの水平ひび割れが発生した。 $R = \pm 1/800(\text{rad})$  のサイクルで壁の中央高さより下部に引張側からの斜めひび割れが複数発生した。 $R = \pm 1/400(\text{rad})$  で開口左右の壁に対角状の斜めひび割れが発生した。開口縁には最後までほとんどひび割れは生じなかつ



写真－1 1/100 終了時破壊状況

た。 $R=+1/100(\text{rad})$  に向かうサイクルで圧縮側となった壁に生じた斜めひび割れが開口隅角部と圧縮側脚部を結ぶように急激に成長した。 $R=-1/100(\text{rad})$  に向かうサイクルで斜めひび割れが大きく開き、圧縮側壁の脚部が圧壊し、耐力低下が著しかったため載荷を終了した。

通常の開口補強を施した No.2 の破壊経過は No.1 とほぼ同様で、開口左右の壁に生じた対角状の斜めひび割れが大きく開くことによって耐力低下を生じた。

炭素繊維シートで開口周囲を補強した No.3 では、 $R=\pm 1/1500(\text{rad})$  のサイクルで開口隅角部から生じたとみられるひび割れが上スタブの下部に観察された。No.1, No.2 と同様  $R=\pm 1/800(\text{rad})$  のサイクルで壁の中央高さより下部に引張側からの斜めひび割れが複数発生した。 $R=+1/400(\text{rad})$  のサイクルで開口左側の圧縮側壁に対角状の斜めひび割れが、 $R=-1/200(\text{rad})$  で開口右側の圧縮側壁にやはり対角状斜め断ひび割れが発生し、これらのひび割れが変形の増加とともに開いた。 $R=-1/100(\text{rad})$  へ向かうサイクルでこれらの斜めひび割れが顕著に開き、壁脚部のコンクリートが圧壊剥落して耐力低下した。また、開口隅角部周辺の炭素繊維シートに剥離が生じた。

開口を鋼材で補強した No.4 でも、 $R=\pm 1/1500(\text{rad})$  のサイクルで開口隅角部からの斜め

ひび割れが生じた。また他の試験体と同様、 $R=\pm 1/800(\text{rad})$  のサイクルで壁の中央高さより下部に引張側からの斜めひび割れが複数発生した。 $R=\pm 1/400(\text{rad})$  で圧縮側の壁に、 $R=-1/200(\text{rad})$  で開口両側の壁に対角状の斜めひび割れが発生し変形の増加とともにこれらの斜めひび割れが開いていったが、他の試験体と異なり開口縁付近のひび割れは最後まで幅が小さく、鋼材による拘束の効果が見られた。開口上部の鋼材定着部分は最後まで損傷は生じなかった。

### 3.2 荷重－変形関係

各試験体のせん断力( $Q$ )－水平変形( $\delta$ )関係を図－4 に示す。

開口のない No.5 は  $R=\pm 1/200(\text{rad})$  の 1 回目のサイクルで壁両側の曲げ補強筋が壁脚部の位置で引張降伏した。 $R=\pm 1/100(\text{rad})$  の繰り返しまで顕著な耐力低下はなく、この振幅の 1 回目のサイクルで正負の最大耐力に達した。 $R=+1/50(\text{rad})$  のサイクルで最大耐力の 80% 以下に耐力低下した。破壊経過と合わせて、本試験体は曲げ降伏後にせん断破壊したと判定できる。

No.1 は  $R=\pm 1/200(\text{rad})$  の 1 回目のサイクルで正負の最大耐力に達した。 $R=+1/100(\text{rad})$  に向かうサイクルで斜めひび割れの急激な成長とともに著しい耐力低下を生じた。

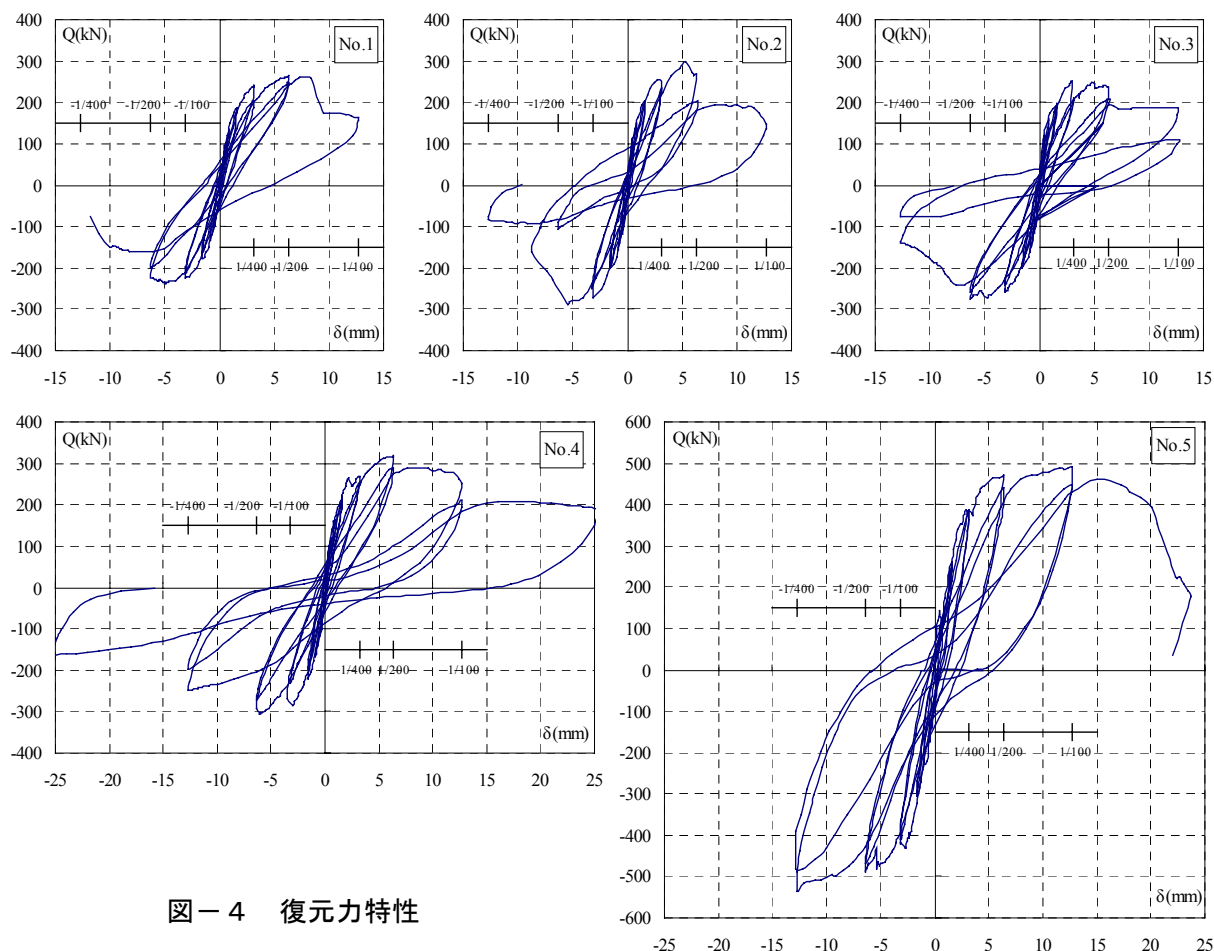


図-4 復元力特性

No.2 は  $R=\pm 1/200(\text{rad})$  の 1 回目で正負の最大耐力に達し、No.1 の最大耐力と比較すると正側で約 113%、負側で 122%となった。負側の最大耐力直後に開口両側壁に対角状の斜め断ひび割れが入ると同時に急激に耐力が低下した。

No.3 は  $R=+1/400(\text{rad})$  の 1 回目で正側最大耐力に達し、 $R=-1/200(\text{rad})$  の 1 回目のサイクルで負側最大耐力に達した。No.1 の最大耐力と比較すると正側で約 96%、負側で約 116%となった。No.2 の最大耐力と比較すると正側で約 85%、負側で約 95%となった。すなわち、炭素繊維シートによる補強によって、無補強の場合より正側でほぼ同等、負側で 2 割弱の耐力の改善がみられたが、通常開口補強程には改善されなかった。最大耐力に達した後は、正負共に緩やかに耐力が減少し、 $R=\pm 1/100(\text{rad})$  のサイクルで最大耐力の 80%以下となった。

No.4 は  $R=\pm 1/200(\text{rad})$  の 1 回目で正負の最大

耐力に達し、No.1 の最大耐力と比較すると正側で約 120%、負側で 129%となり、開口補強の効果が見られた。No.2 と比較すると正負ともに約 106%となり、僅かではあるが通常開口補強の耐力をも上回った。最大耐力に達した後は、正負共に緩やかに耐力が減少し  $R=\pm 1/100(\text{rad})$  の 2 回目のサイクルでそれぞれ最大耐力の 80%以下となった。本試験体は耐力低下の進行が他の有開口試験体より明らかに小さく  $R=\pm 1/50(\text{rad})$  までの載荷が可能であった。

No.1~4 は、壁両側の曲げ補強筋は降伏せず、破壊状況と合わせて、開口両側の 2 枚の壁のせん断破壊と判断できる。

#### 4. 耐力の評価

表-4 に最大耐力の実験値及び計算値を示す。曲げ耐力  $Q_{Mu}$  およびせん断耐力の計算値  $calQ_{su.min}$  は文献<sup>3)</sup>による次式から材料試験の結果

表－４ 実験値と計算値の比較

試験体	実験値				計算値			exp Q <sub>max</sub> / cal Q <sub>su.min</sub>
	最大耐力	最大せん断応力度	最大耐力時部材角	限界部材角	曲げ耐力	せん断耐力	せん断応力度	
	exp Q <sub>max</sub> (kN)	exp τ <sub>max</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>Qmax</sub> (%)	R <sub>Q80%</sub> (%)	cal Q <sub>mu</sub> (kN)	cal Q <sub>su.min</sub> (kN)	cal τ <sub>su.min</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
NO.1	265	2.20	0.50	0.71	396	265	2.20	1.00
NO.2	298	2.48	0.42	0.52	438	293	2.44	1.02
NO.3	274	2.28	0.50	0.66	396	272	2.26	1.01
NO.4	318	2.64	0.50	1.00	433	307	2.56	1.04
NO.5	535	3.24	1.01	1.57	577	358	2.17	1.49

を用いて算出した。

$$cal Q_{su.min} = \left\{ \frac{0.0538 p_{ef}^{0.23} (F_c + 17.6)}{M / (Q \cdot D) + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} b_e \cdot j \quad (1)$$

$$M_{ul} = 0.9 a_x \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4 a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot D + 0.5 N \cdot D \left( 1 - \frac{N}{B_c \cdot D \cdot F_c} \right) \quad (2)$$

有開口壁は等価開口周比が 0.47 であり開口低減率の適用限界を超えており、実験において開口を挟んで独立した挙動を見せていたので、2枚の壁とみなして計算した。すなわち開口両側に長さ 667.5mm、高さ 1220mm の独立した2枚の壁があるものとし、これらが逆対称曲げせん断力を受けるものとして、(1)、(2)式による耐力評価を行った。このとき試験体 No.2 では開口補強筋 2-9φ、No.4 では開口脚部のアンカー筋 1-D16 を引張鉄筋として考慮した。

最大せん断応力度の実験値 exp τ<sub>max</sub> をみると、開口を設けることにより低下する。補強方法による強度の大小関係では、鋼材補強 > 通常の開口補強 > 炭素繊維シート補強 > 無補強となった。開口のある全ての試験体で実験値は計算値とほぼ同程度の値となった。

変形性能を表す指標として、最大耐力が 80% に低下した時点での部材角 R<sub>Q80%</sub> を表－４に記載した。No.1～No.3 は最大耐力後、急激に耐力を失ったため、R<sub>Qmax</sub> から R<sub>Q80%</sub> までの差が小さい。これに対し、鋼材補強を施した No.4 は最大耐力以降、2 倍程度の変形まで耐力を維持した。

## 5. まとめ

既存鉄筋コンクリート造耐力壁の静的加力実

験を行い、人通用の新設壁開口が耐力に及ぼす影響、またこの開口を補強した場合の補強効果について検討した結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 開口を新設することにより、破壊形式が曲げからせん断に変化し、最大せん断応力度レベルは、やや低下した。
- 2) 開口周囲の補強方法の違いによる耐力の改善効果はあまり顕著ではなかったが、鋼材を用いた補強方法では無補強の場合に比べ 2 割程度の耐力増加がみられ、最大耐力以降急激な耐力低下は生じなかった。

## [謝辞]

本研究は(社)建築研究振興協会内に組織された「次世代に対応した室内空間拡大技術の開発委員会（委員長 勅使川原正臣名古屋大学教授）」のプロジェクトの一環として行なわれた。委員会の関係者各位、および横浜国立大学技官・畠中雄一氏、同大学生、塚越弘氏、水野生氏に感謝の意を表す。

## 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 pp218-241, 1999
- 2) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案 pp401,402, 2002
- 3) 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 pp281,282, 1990