

# 論文 鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の曲げ挙動に関する実験的研究

岩本 周晃\*1・津田 和明\*2

要旨：現在の有開口耐震壁の耐震設計法では、開口の影響を受けるのは、せん断挙動のみと考えられており、開口の形状に応じて、せん断剛性とせん断終局強度を低減させている。曲げ挙動に関しては、開口の影響は小さいと考えられている。しかし、既往研究より、開口の存在により、曲げ終局モーメントと曲げひび割れ後の曲げ剛性が低下することが分かった。このような知見に基づき、開口形状、開口位置の異なる試験体を作製し、実験を行った。実験結果より、比較的大きなドア型開口が、曲げモーメントに対して圧縮側に存在する場合は、曲げ終局モーメントが大きく低下することが分かった。

キーワード：有開口耐震壁，曲げ挙動，曲げ終局モーメント

## 1. はじめに

現在の有開口耐震壁の耐震設計法では、開口の影響を受けるのはせん断挙動のみとし、せん断変形成分の剛性とせん断終局強度を低下させている。曲げ挙動に関しては、開口の影響は小さいと考えられている。そのため、大半の設計者は、曲げ挙動に対し開口の影響を無視しており、開口の影響を考慮する場合でも、開口位置の縦筋を削減して曲げ終局モーメントを算定する程度である。しかし、既往研究(石川, 河野らの実験論文<sup>1)</sup>, 筆者らのFEM解析による論文<sup>2)</sup>)で、曲げ挙動も開口の影響を受けることが分かった。現在の有開口耐震壁の設計法では、曲げ挙動に対する開口の影響を考慮していないため、有開口耐震壁が設置された建物では、建物の剛性、耐力が設計値と異なり、地震時に想定以上の被害を受けることも考えられる。このような背景を受け、本研究では有開口耐震壁の実験を行い、開口の曲げ挙動への影響を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要及び材料特性

図-1に試験体寸法及び配筋図を記す。試験体は、ドア型開口を有する単層耐震壁である。基準となる無開口耐震壁NOP, 開口位置が側柱横に偏在するLOPH, 開口位置が中央に位置するCOPH, COPHに対し開口高さが半分であるCOPLの計4体である。材料特性を表-1に記す。なお、試験体の柱主筋比, 帯筋比, 壁筋比は, 0.57%, 0.34%, 0.36%であり、壁厚は70mmである。

計算上、試験体4体とも曲げで破壊するよう、設計を行った。設計に用いたせん断終局強度は、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2010」<sup>3)</sup>より求めた無開口耐震壁のせん断終局強

度に、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」<sup>4)</sup>による開口低減率を乗じることで算出し、曲げ終局モーメントは、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)」<sup>5)</sup>に示された(1)式により算出した。以下の式中の記号の単位は、SI単位系であり、力はN, 距離はmmである。

$${}_n M_u = a_g \sigma_{cy} \ell + 0.5 a_{wv} \sigma_{wy} \ell + 0.5 N \ell \quad (1)$$

上式中、 $a_g$ ,  $\sigma_{cy}$  は引張側柱の全主筋断面積とその降伏強度、 $a_{wv}$ ,  $\sigma_{wy}$  は壁板全縦筋の断面積とその降伏強度、 $N$ は軸力、 $\ell$ は側柱芯々間距離である。

### 2.2 載荷計画

載荷状況を写真-1に示す。軸力は、鉛直アクチュエーターで両側柱に計188kN(柱断面積に対する軸力比: 0.091)を加え、水平力は、水平アクチュエーターで平面中央の一点に押し引きを行った。基礎上端でのシアパン比は、 $M/Q\ell$ ( $\ell$ :壁全長)=1.2である。水平力の載荷

表-1 試験体の材料特性

(A) 鉄筋の材料特性

呼び径	4	D6
降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	593	395
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	674	501
ヤング係数×10 <sup>5</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	1.964	1.854
伸び率(%)	12.50	22.3

(B) コンクリートの材料特性

圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	45.9
割裂強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.82
ヤング係数×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	2.98

\*1 近畿大学大学院 産業理工学研究科 (正会員)

\*2 近畿大学産業理工学部 建築・デザイン学科 教授 博士 (工学) (正会員)

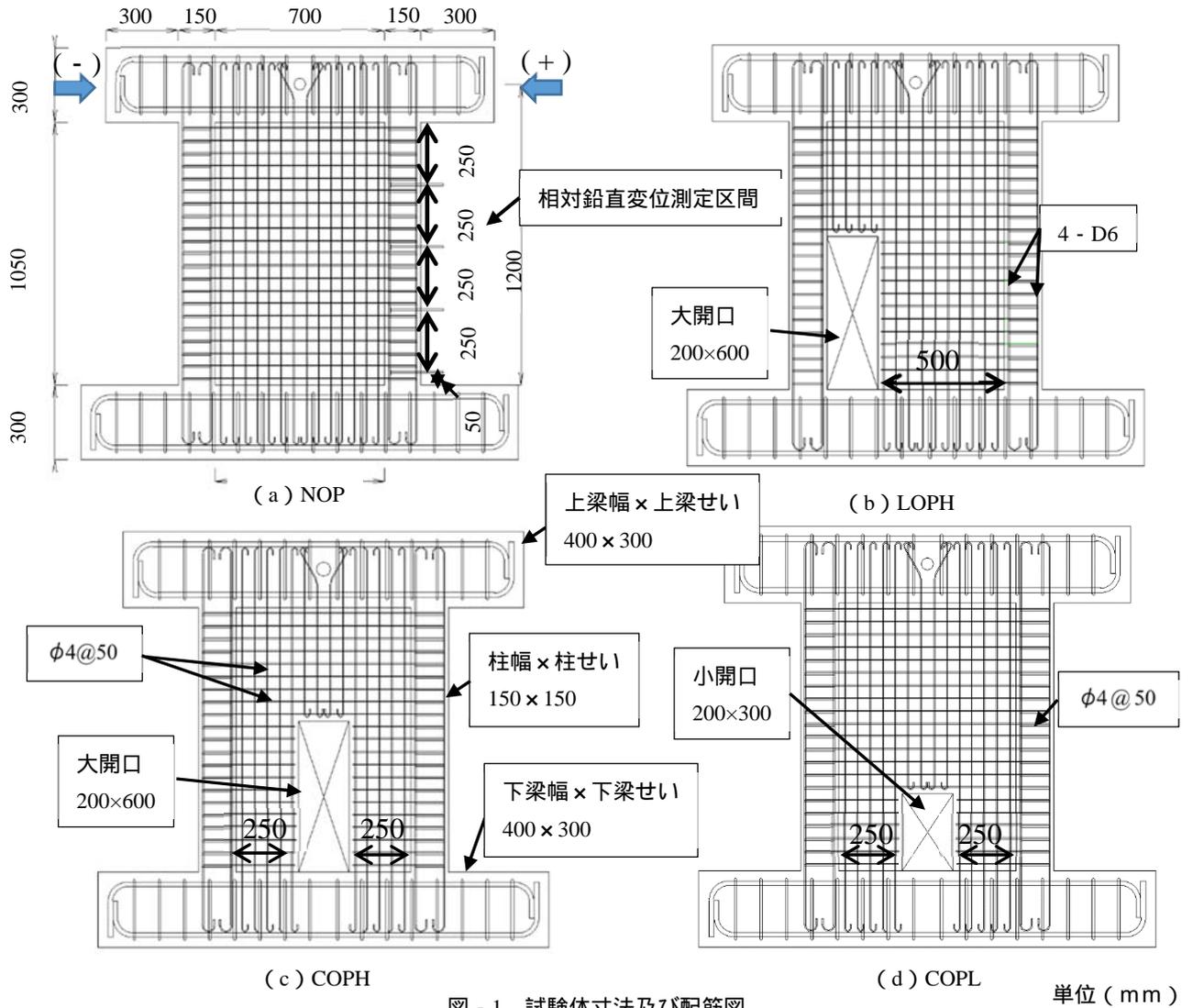


図 - 1 試験体寸法及び配筋図



写真 - 1 実験状況

は、 $R$  (部材角: 水平変位を基礎上端から加力点までの高さ 1200 mm で除した値) = 0.25% ,  $R=0.5%$  ,  $R=1.0%$  ,  $R=2.0%$  を各 2 回ずつ正負交番に繰り返した後、 $R=4.0%$  となるまで正方向に単調加力をしたところで終

表 - 2 最大耐力の実験値及び曲げ終局強度の計算値

	NOP	LOPH	COPH	COPL
実験値 (正負) (kN)	158.5	131.5	152.0	155.5
	141.0	130.0	139.5	138.0
計算値 (正負) (kN)	140.0	135.0	124.6	128.8
	140.0	122.6	124.6	128.8
実験値/計算値 (正負)	1.132	0.970	1.220	1.207
	1.007	1.060	1.120	1.071

了とした。

変位は、水平力高さと基礎上端との相対水平変位と両側柱側面で相対鉛直変位 (壁内法高さを 5 分割) を測定した。

### 3. 実験結果

図 - 2 に各試験体の水平荷重 - 部材角関係を示す。図中には、破壊経過を示した。また、表 - 2 に最大耐力の実験値と計算値の強度比を示す。計算式は、(2)式を用いた。(2)式は開口位置の壁縦筋を削減して計算している。

$${}_n M_u = a_g \sigma_{cy} l + a_{wv1} \sigma_{wy} l_1 + a_{wv2} \sigma_{wy} l_2 + 0.5Nl \quad (2)$$

上式中、 $a_g$ 、 $\sigma_{cy}$ 、 $\sigma_{wy}$ 、 $N$ 、 $l$ は(1)式と同じであり、 $a_{wv1}$ 、 $l_1$ は開口より引張側にある壁板縦筋の全断面積とそれらの重心位置と圧縮側柱芯との距離、 $a_{wv2}$ 、 $l_2$ は開口より圧縮側の値である。

各試験体とも、100 kN までに柱脚部に曲げひび割れが発生した。COPH、LOPHは開口隅角部にせん断ひび割れが発生、COPHは開口隅角部に水平に近いひび割れが発

生し、その後、開口横の壁板にせん断ひび割れが発生した。NOPは、 $R=1.0\%$ の加力中に、柱の高さ中央に曲げひび割れ、壁板に斜めひび割れが発生した。最大耐力は、各試験体とも、 $R=1.0\%$ 時にほぼ最大耐力に到達し、その後、引張側柱主筋の破断により耐力が低下した。

### 4. 負方向荷重時の耐力補正について

表 - 2 に示した通り、正負対象であるNOP、COPH、COPH、COPLは正方向、負方向の実験値で耐力の差が出ている。これは、壁板縦筋に丸鋼、側柱主筋に付着力の弱いD6を用いたため、正加力時に生じた脚部曲げひび割れが負加力に転じて、しばらく閉じず、正方向加力時の脚部曲げひび割れ発生領域での圧縮力の伝達が遅れたためと思われる(図 - 3 水平荷重 - 最下部相対鉛直変位(正加力時引張側: 第1サイクル): 正加力終了時の荷重0kN時

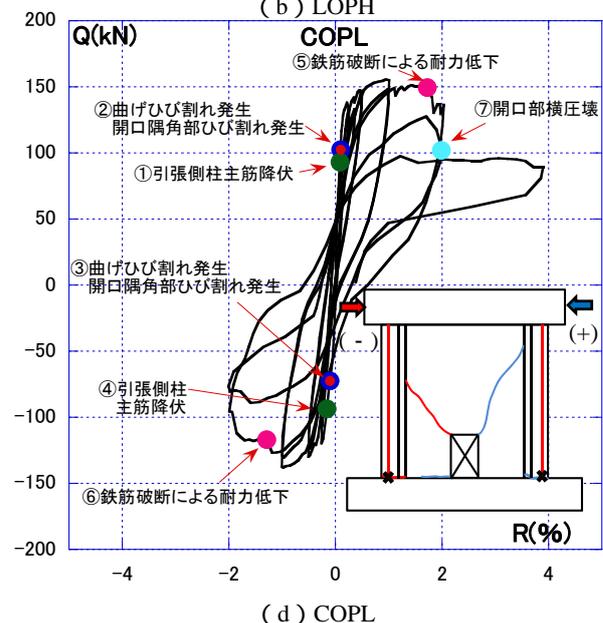
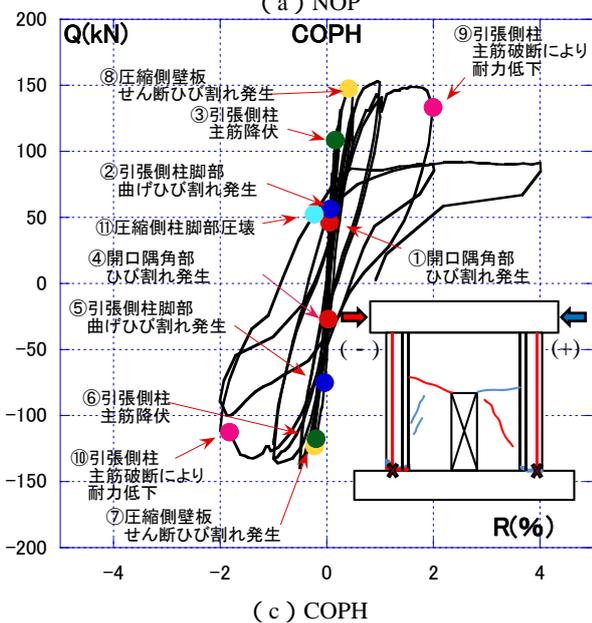
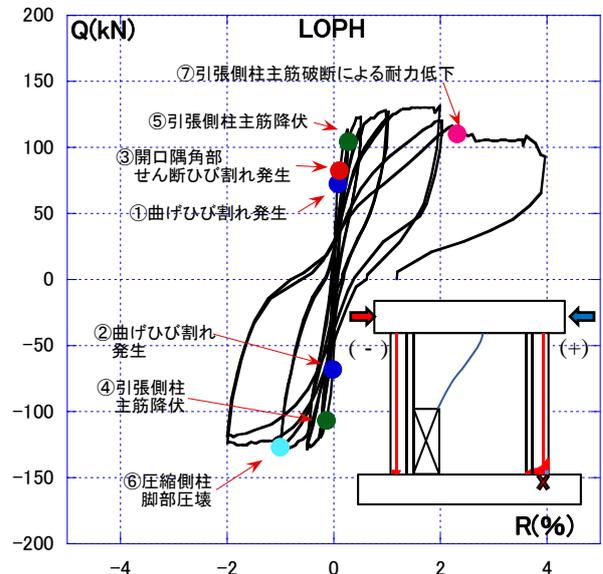
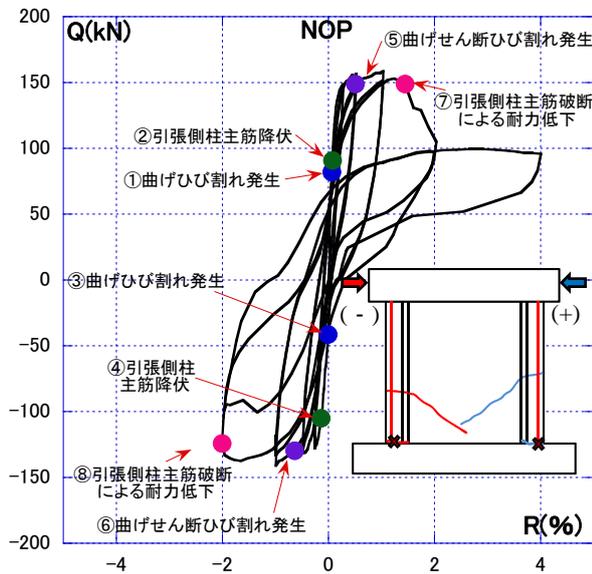


図 - 2 水平荷重 - 部材角関係及び破壊経過

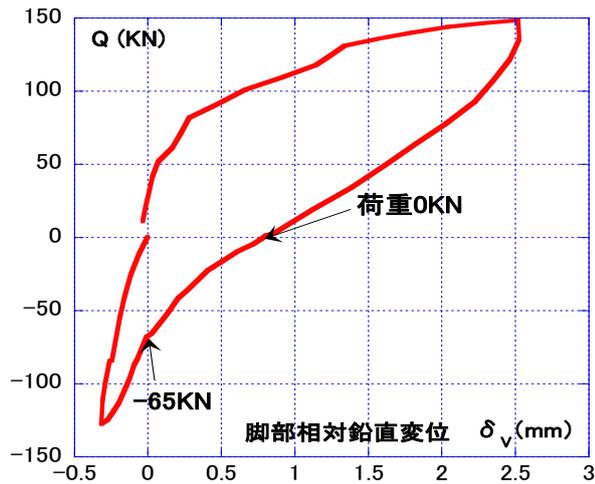
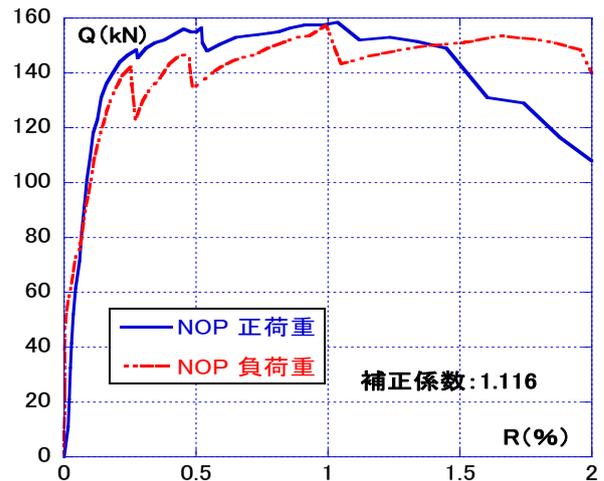
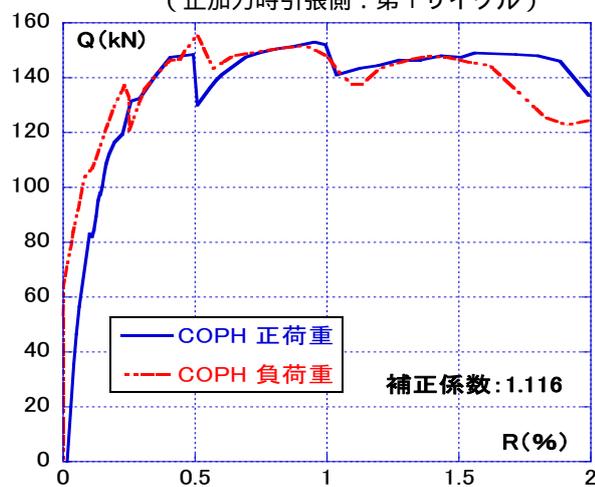


図 - 3 水平荷重 - 最下部相対鉛直変位

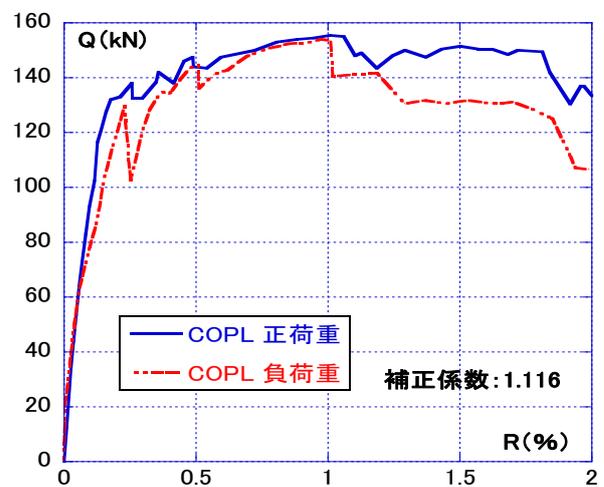
(正加力時引張側：第1サイクル)



(a) NOP



(b) COPH



(c) COPL

図 - 4 NOP, COPL, COPH の正負の水平荷重 - 部材角関係の比較

では、引張側になっており、負加力時に圧縮側に転じたのは、 $Q = -65kN$  時であった。よって、今回は、正負対称試験体 3 体の正負の最大耐力比（正 / 負）の平均値（1.116）を各試験体の負方向の荷重に乘じることにした。その結果を図 - 4 に示す。また、以降、負加力時に開口が引張側に位置する LOPH の負加力時を ROPH と呼ぶ。

図 - 4 より最大耐力比の平均値を乘じたことで、各試験体の正負の水平荷重 - 水平変位関係は、ほぼ一致したことが分かる。

#### 5. 全体変形及び曲げ変形の包絡線比較

水平荷重 - 水平変位関係の包絡線比較を図 - 5 に、水平荷重 - 曲げ変形関係の包絡線比較を図 - 6 に示す。曲げ変形は、両側柱側面から測定した相対鉛直変位から曲率を求め、それを積分することにより算定した。

図 - 5, 6 を見ると、全試験体とも、水平荷重 - 全体変形と水平荷重 - 曲げ変形関係はほぼ一致しており、曲げ変形成分が支配的であることが分かる。

NOP と開口が小さい COPL は、耐力差がほとんど無かった。開口が小さい場合は、曲げ終局モーメントに対する開口の影響は小さいものと思われる。正方向載荷時に、大開口が圧縮側にある LOPH の最大耐力は、NOP より約 17%（27kN）減少した。一方、開口位置が引張側となる ROPH では、NOP からの耐力低下率は 8.45%（13.4kN）であり、LOPH ほどの耐力低下が見られなかった。COPH の最大耐力は、NOP, COPL と変わらなかった。しかし、筆者らが行った FEM 解析<sup>2)</sup>では、大開口が引張側または中央に位置する耐震壁も、無開口耐震壁からの曲げ終局モーメントの低下量が、今回の実験よりも大きいことが分かっている。FEM 解析と実験結果が異なった要因として、FEM 解析はコンクリートと鉄筋が一体になっているのに対し、今回の試験体は、壁筋に丸鋼を使用していたためと思われる。つまり、コンクリートと鉄筋が一体の場合では開口により分断される引張側壁板に大きな局部曲げが生じるが、付着がない場合には、局部曲げが小さく、全体曲げが支配的になったものと推察される。こ

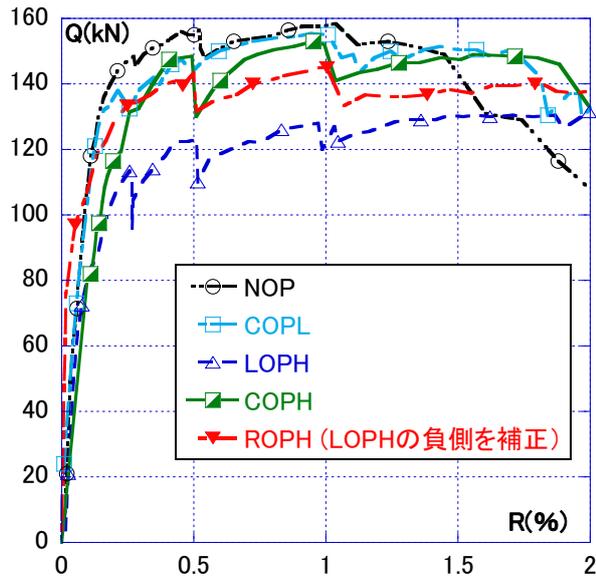


図 - 5 水平荷重 - 水平変位関係の包絡線比較

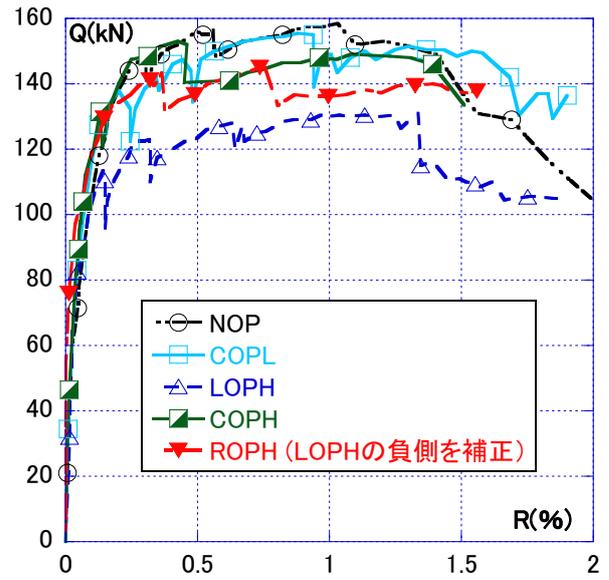


図 - 6 水平荷重 - 曲げ変形関係の包絡線比較

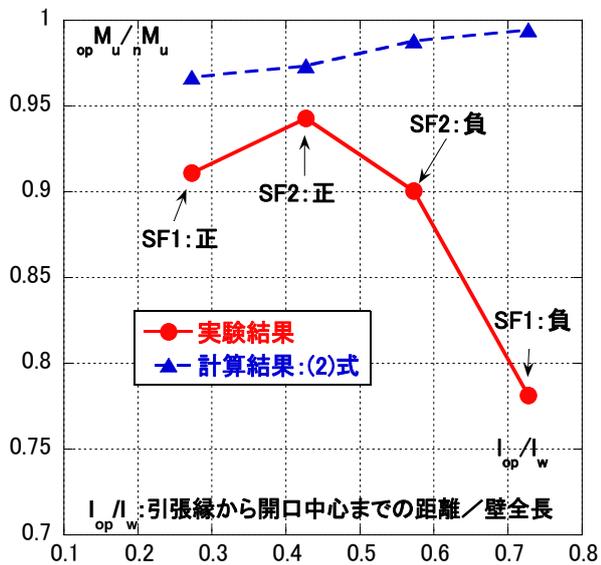


図 - 7 曲げ終局モーメント低下率と開口位置の関係 (既往研究)

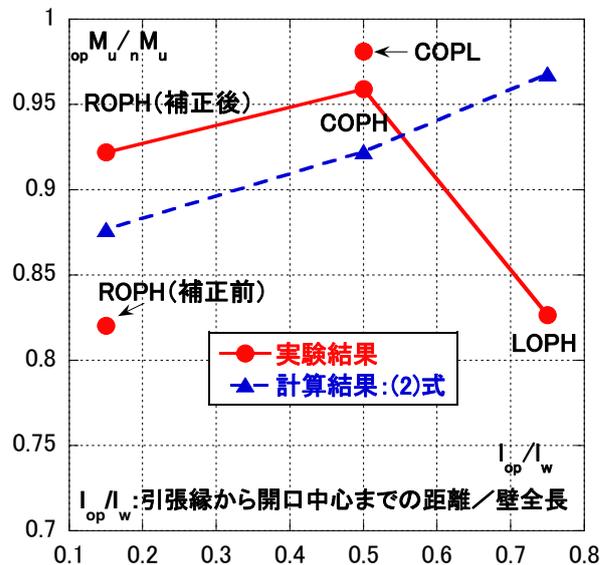


図 - 8 曲げ終局モーメント低下率と開口位置の関係 (実験結果)

れに関しては、今後、今回の実験を対象とした FEM 解析を行い、詳細に検討したい。

また、今回の実験では、曲げひび割れ後の剛性に対する開口の影響は確認できなかった。

#### 6. 曲げ終局モーメント低下率と開口位置の関係

曲げ終局モーメント低下率と開口位置の関係を検討するために、今回の実験結果と既往実験結果を用いた。既往実験結果は、石川、河野<sup>1)</sup>が行った実験結果である。検討対象とした試験体は、開口の形状がドア型開口である試験体 SF1 と SF2 を対象とした。SF1 は開口位置が側柱近くに偏在する試験体で、SF2 は開口位置が中央よりに位置する 2 層の試験体である。試験体全長が 2750mm、1 層の壁内法高さが 1100mm で、開口の幅が 400mm、高

さが 800mm である。この実験の詳細は石川、河野<sup>1)</sup>らの論文を参照願いたい。

図 - 7、図 - 8 に無開口耐震壁と有開口耐震壁の曲げ終局モーメントの比 (有開口 / 無開口) と開口位置の関係を示す。図 - 7 が石川らの実験結果、図 - 8 が今回の実験結果である。図 - 7、図 - 8 の横軸は、引張縁から開口中心までの距離を壁全長で除した値である。横軸の 0.5 より左側の部位は開口位置が引張側に位置し、0.5 より右側の場合は開口位置が圧縮側に位置する。図中には、既往算定式 (2) 式による計算結果も示した。

図 - 7、図 - 8 の実験値の変動傾向を見ると、基本的に開口の存在により、無開口耐震壁から曲げ終局モーメントが低下しており、開口が圧縮側にある場合は、低下量が多いことが分かる。これに対し、(2) 式による曲げ終

局モーメントの計算結果では、開口位置が引張側にある場合は実験結果と対応しているが、開口位置が圧縮側にある場合は実験結果と対応せず、実験結果が計算結果を大きく下回っている。

今回の検討で、開口が圧縮側に存在する場合、有開口耐震壁の無開口耐震壁からの曲げ終局モーメントの低下率が大きく、実験値と既往算定法の計算値は対応しないことが分かった。これは、早急に対応すべき問題と考える。

#### 7.まとめ

ドア型開口を有する耐震壁の曲げ挙動を検討するため、試験体を製作し、実験を行った。また、この実験結果と既往実験結果を用いて曲げ終局モーメントの既往算定法の検討を行った。検討の結果、得られた知見を以下に記す。

- 小開口が中央に存在する耐震壁の曲げ終局モーメントは、無開口耐震壁とほとんど差が無かった。
- 開口が圧縮側に存在する場合、曲げ終局モーメントは無開口耐震壁から大きく低下する。

今後は、FEM解析を行い、開口の影響を詳細に検討し、

有開口耐震壁の曲げ挙動算定法を考案したいと考えている。

#### 謝辞

本研究の試験体製作及び実験進行において、元近畿大学教授平松晃氏と原工務店の方々大変お世話になった。ここに厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 石川俊介, 岡田勇佑, 坂下雅信, 河野進: 曲げ変形が卓越する有開口 RC 造耐震壁の終局性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp463-468, 2011
- 2) 津田和明, 萩尾浩也: 鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の曲げ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.373-378, 2015
- 3) 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, 日本建築学会, 1999
- 4) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, 日本建築学会, 2010
- 5) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 (1990), 日本建築学会, 1990