

# 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研究

津田 和明\*<sup>1</sup>・萩尾 浩也\*<sup>2</sup>

要旨：現在の耐震設計法では、有開口耐震壁において、開口の影響を受けるのはせん断挙動のみとし、開口の大きさに応じて、せん断変形成分の剛性やせん断終局強度を低減しており、曲げ挙動に関しては、開口によって削減される縦筋を考慮して曲げ終局モーメントを算定する程度である。しかし、既往実験結果、FEM解析結果によれば、曲げ終局強度は開口位置の縦筋削減以上に低下する場合があることが判明した。また、開口の存在により曲げ変形成分の剛性も低下することが分かった。この結果を受け、開口形状、大きさをパラメーターとしたFEM解析を行い、それらパラメーターと曲げ挙動の関係を検討し、種々の知見を得た。  
 キーワード：有開口耐震壁, FEM解析, 曲げ剛性, 曲げ終局強度

## 1. はじめに

現在の耐震設計法では、有開口耐震壁において、開口の影響を受けるのはせん断挙動のみとし、開口の大きさに応じて、せん断変形成分の剛性やせん断終局強度を低下させている<sup>1)</sup>。曲げ挙動に関しては、開口の影響は小さいとして、明確な規定は存在しない。大半の設計者は、曲げ挙動に対し開口の影響は無視しており、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、開口の存在により曲げ剛性、曲げ終局モーメントが少なからず低下する場合には、曲げ挙動が卓越する有開口耐震壁が設けられた建物では、建物の剛性、耐力が設計値に比べ小さくなり、地震時に想定以上の被害を受けることも考えられる。そこで、既往実験結果、FEM解析により、開口の曲げ挙動への影響程度を検討することにした。

## 2. 既往実験結果からの知見

### 2.1 検討対象とする既往実験結果

有開口耐震壁の曲げ挙動に関する論文を検索して、先ず驚いたことは、その論文数の少なさである。特に、曲げ挙動への影響が最も大きいと予想されたドア型開口を有する耐震壁の曲げ挙動に関する研究は二編（正負の曲げ降伏荷重や最大荷重など、情報が明解なもの）しか入手できなかった。

その一編は、中西らの実験研究<sup>2)</sup>である。中西らは、3層で無開口と、ドア型開口が中央と端に位置する場合の実験を行っている。しかし、これらのドア型開口を有する試験体では、中間梁の損傷が大きく、耐力、剛性にこの影響が少なからずあったものと思われる。よって、これらの試験体は検討対象から除外した。

もう一編は、石川、河野らが行なった2層耐震壁の実

験研究<sup>3)</sup>であり、比較用の無開口試験体と、ドア型開口を有する試験体では、開口幅と位置をパラメーターとした3体の実験を行っている。この実験は、全断面積に対する軸方向応力度 $2.62\text{N/mm}^2$ を保持しながら、曲げ挙動を卓越させるため、試験体頂部でモーメントを付加し、壁脚部でのシアスパン比( $M/Q\ell$ :  $\ell$ は側柱芯々間距離)は2.0となっている。有開口試験体の開口低減率は、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010」<sup>1)</sup>に示された式で、RF1が0.54, SF1とSF2が0.68である。これら試験体の形状を図-1に、実験より得られた荷重～変位関係の包絡を図-2に示す。この他の情報は、文献2)を参照願いたい。この実験結果は非常に貴重なもので

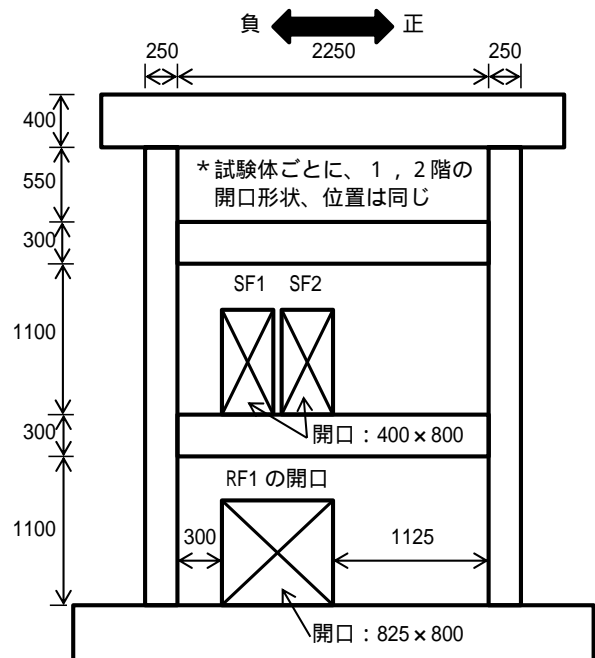


図 - 1 石川、河野らの試験体形状

\*1 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)

\*2 大林組 技術研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

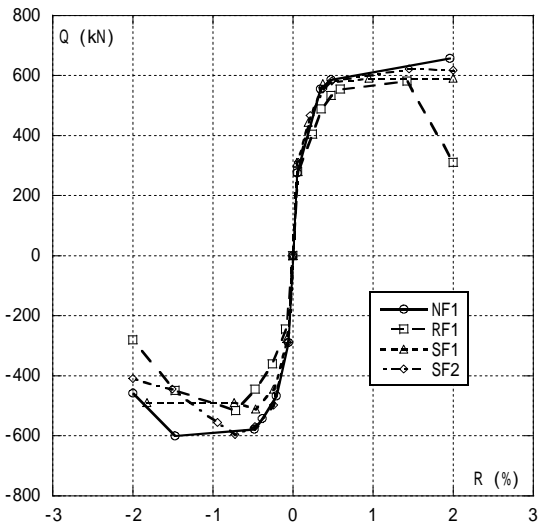


図 - 2 石川，河野らの実験の荷重～変位関係

あると思われるが，残念ながら，無開口試験体のせん断力による損傷がやや大きく，最大耐力が正負で約 9% (最大耐力の差を低い方の最大耐力で除した値) 異なっている。最大耐力が大きい正方向の荷重～水平変位関係を見ると，荷重一定領域を形成しており，ほぼ曲げ終局強度に達していると判断できることから，ここでは，無開口試験体の曲げ終局強度として正方向の最大荷重を採用することにした。有開口試験体も一部せん断力の影響を受けている可能性があるが，全て曲げ降伏が先行しており，この論文筆者らも全試験体の耐力を曲げ終局強度として捉えていることから，本論でも最大耐力は全て曲げ終局強度として取り扱うことにした。論文中には，曲げ変形成分に関して記述がないことから，ここでは，曲げ終局強度に関してのみ検討することにした。

## 2.2 既往実験結果の検討

検討対象とした石川，河野らの実験より得られた曲げ耐力時脚部曲げモーメントと，式(1)の無開口耐震壁の曲げ終局モーメント算定式を基に，開口の幅と位置を考慮して壁板縦筋の量と位置を反映した式(2)で算定した結果を比較して，表 - 1 に示す。表中 ( ) 内の値は，無開口耐震壁に対する曲げ終局モーメントの比を示す。また，開口形状が同じである SF1 と SF2 に対し，曲げ終局モーメントの無開口耐震壁との強度比と開口位置 (引張縁から開口中央までの距離を壁全長で除した値で表した) の関係を，実験結果と式(2)による計算結果を比較して図 - 3 に示した。式(1)，(2)は以下の通りである。

$$c-n M_u = a_g \sigma_{cy} \ell + 0.5 a_{wv} \sigma_{wy} \ell + 0.5 N \ell \quad \text{式(1)}$$

$$c-op M_u = a_g \sigma_{cy} \ell + a_{wv1} \sigma_{wy} \ell_1 + a_{wv2} \sigma_{wy} \ell_2 + 0.5 N \ell \quad \text{式(2)}$$

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

表 1 石川，河野らの実験の曲げ終局モーメントの比較

試験体名	加力方向	実験値 $eM_u$ (kNm)	計算値 $c-op M_u$ (kNm)	$eM_u / c-op M_u$
NF1	正	3320	2780	1.19
RF1	正	2930 (0.88)	2510 (0.90)	1.17
	負	2400 (0.72)	2590 (0.93)	0.93
SF1	正	3020 (0.91)	2620 (0.94)	1.15
	負	2590 (0.78)	2720 (0.98)	0.95
SF2	正	3130 (0.94)	2660 (0.96)	1.18
	負	2990 (0.90)	2690 (0.97)	1.11

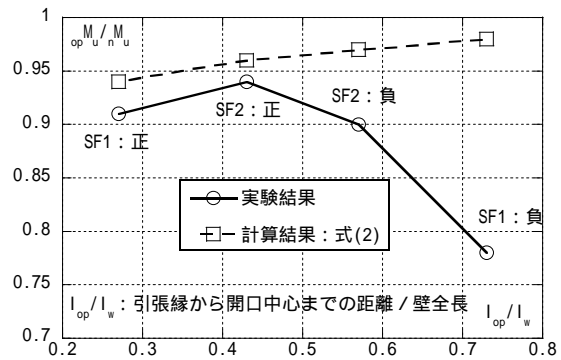


図 - 3 石川，河野らの実験の曲げ終局モーメントの変動傾向

度， $N$  は軸力， $\ell$  は側柱芯々間距離である。また， $a_{wv1}$ ， $\ell_1$  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， $a_{wv2}$ ， $\ell_2$  は開口より圧縮側の値である。これらは SI 単位系である。

有開口耐震壁試験体の加力方向が正の場合は開口が引張側に，負の場合は開口が圧縮側に位置する。

実験値の変動傾向を見ると，基本的に開口の存在により，曲げ耐力時脚部曲げモーメントが無開口耐震壁から低下していること，この低下量は開口が圧縮側にある方が大きい(強度比が小さい)ことが分かる。これに対し，計算による曲げ終局モーメントは，開口が引張側にある方が無開口との強度比が小さくなっており，変動傾向が実験結果と異なる。このため，実験値と計算値の比較では，開口位置が引張側にある場合は，実験値 / 計算値は無開口の場合とほぼ同じであるが，開口位置が圧縮側の場合は実験値 / 計算値が小さくなり，比較的開口幅が大きい RF1 と開口位置がより端に位置している SF1 の負方向 (開口位置が圧縮側) では，実験値 / 計算値は 1.0 を下回っている。

上記の検討より，ドア型開口を有する耐震壁の曲げ終局モーメントに関し，得られた知見を以下にまとめる。

- ・開口の存在により，曲げ終局モーメントは無開口の場合から低下する。
- ・開口が引張側にある場合は，壁板縦筋の量と位置を

反映した式(2)でほぼ妥当に曲げ終局モーメントを算定できる。

- ・開口が圧縮側にある場合は、式(2)よりも無開口からの曲げ終局モーメントの低下割合は大きく、場合によっては危険側の算定結果となることがある。

### 3. FEM 解析による検討

#### 3.1 解析仮定

解析は平面応力場を仮定し、壁板部は壁筋を層状置換した四辺形要素、柱は帯筋を層状置換した四辺形要素、柱主筋は線材置換したトラス要素で表現した。試験体のシミュレーション解析ではスタブを設けたが、その後のパラメトリックスタディーではスタブを設けていない。そのスタブと上部梁は弾性とした。実験結果のシミュレーション解析、パラメトリック解析ともスタブからの鉄筋の抜け出しは考慮していない。コンクリートの材料構成モデルは文献 4),5)に基づき、鉄筋はバイリニアモデルとした。使用プログラムは FINAL である。

シミュレーション解析ではスタブ下端固定、パラメトリック解析では壁脚部固定とし、両解析とも、軸力は上部梁上端の柱位置に与え、水平加力は単調載荷とし、上部梁端面を押すことにより与えた。なお、乾燥収縮の影響は考慮していない。

#### 3.2 解析仮定の検証

##### (1) 解析対象試験体

上記解析仮定の妥当性を検証するために、筆者らが行なった実験<sup>9)</sup>を対象に解析を行った。解析対象は、1 層のドア型開口を有するせん断破壊型の耐震壁である。開口低減率は、0.69 である。試験体形状を図 - 4 に示す。この他の試験体諸元、実験方法などは文献 5)を参照願いたい。本来ならば、曲げ破壊型耐震壁を対象に解析を行うべきと考えていたが、1 層の比較的単純な既往実験結果は見当たらず、今回はこのせん断破壊型耐震壁を対象とした。FEM 解析では変形能を論じることが困難と考え、今回はそれを検討対象としないことから、せん断破壊型でも問題ないと判断した。つまり、曲げ変形成分、柱主筋脚部ひずみ度が的確にシミュレーションできていれば、今回の解析仮定で、ドア型開口耐震壁の曲げの弾塑性剛性(曲げ降伏まで)と曲げ終局強度をほぼ表現できると考えた。

##### (2) 解析結果

曲げ変形成分(せん断力～曲げ変形角関係:解析では、両側柱端部の節点の相対鉛直方向変位から各要素高さの曲率を求め、それを積分することにより曲げ変形を求めた。実験では、両側柱端部で測定した相対鉛直変位を用い、解析と同様に曲げ変形を算定した。)を実験と解析で比較して図 - 5 に、せん断力～側柱主筋脚部ひずみ度関

係の比較を図 - 6 に示す。

対象試験体がせん断破壊型であるため、曲げ変形成分はかなり小さい。このような小さな領域の場合、相対鉛直変位測定の分割数等の影響が大きく表れる。このことに起因し、曲げ変形に関しては、分割数(実験:4分割,解析:要素高さごとに算定:12分割)の多い解析の方が、実験に比べ、やや同せん断力時の曲げ変位が大きい。せん断力～柱主筋脚部のひずみ度関係では、実験と解析は良好に対応している。このことから、今回の解析仮定に

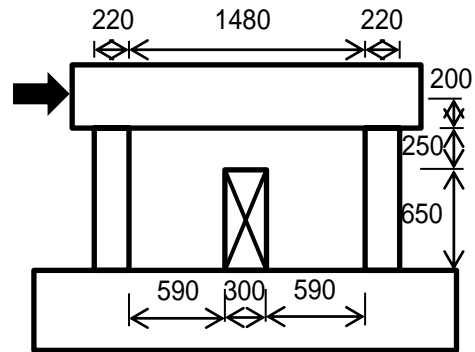


図 - 4 解析仮定検証用試験体の形状

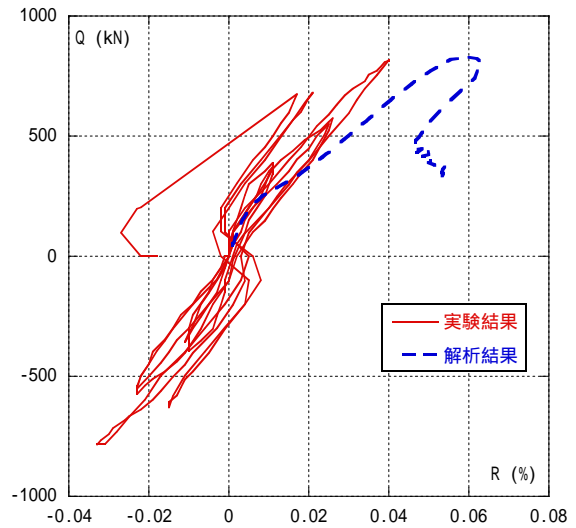


図 - 5 荷重～曲げ変形関係の比較

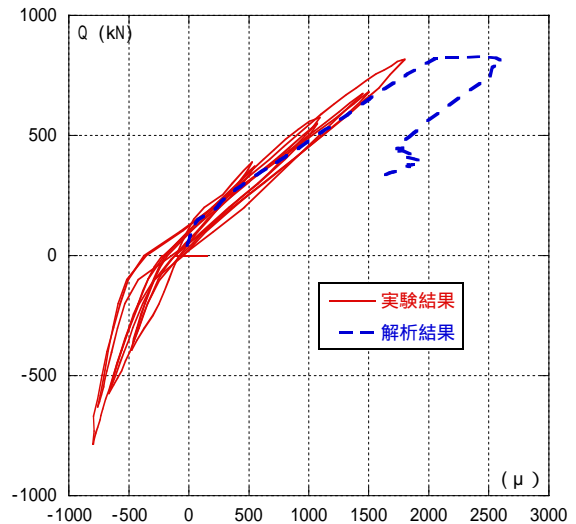


図 - 6 荷重～側柱主筋ひずみ度関係の比較

表 2 パラメトリック解析の諸元

モデル	全体形状					開口形状				コンクリート 圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋				軸方向 応力度 $\sigma_o$ (N/mm <sup>2</sup> )										
	側柱芯々 間距離 $l$ (mm)	加力点高 さ $h$ (mm)	壁厚 $t_w$ (mm)	側柱幅 $B$ (mm)	側柱せい $D$ (mm)	開口幅 $l_o$ (mm)	開口高さ $h_o$ (mm)	開口 低減率 $r_2$	開口位置		壁筋	側柱主筋	側柱帯筋	降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )											
NOP0	2000	2000	70	200	200	400	1200	0.65	引張端	24	D6@133	3-D13	D6@100	295	0.0										
NOP2									中央							2.0									
65L0									圧縮端								0.0								
65C0									引張端									2.0							
65R0								中央	0.0																
65L2								圧縮端											2.0						
65C2								引張端												0.0					
65R2								中央													2.0				
80L0						引張端	0.0																		
80C0						中央		2.0																	
80R0						圧縮端																0.0			
80L2						引張端																	2.0		
80C2						中央																		0.0	
80R2						圧縮端																			2.0

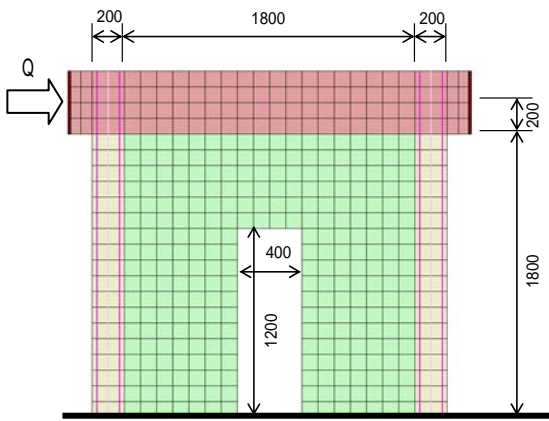


図 - 7 解析モデル

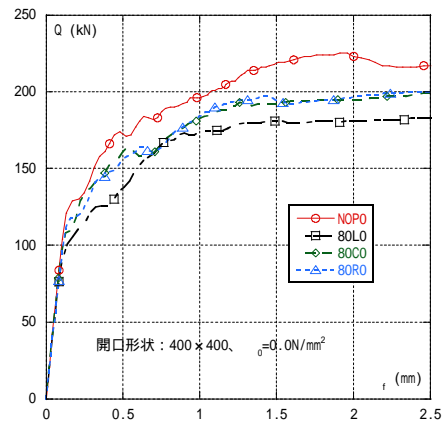


図 - 10 荷重～曲げ変形関係 3

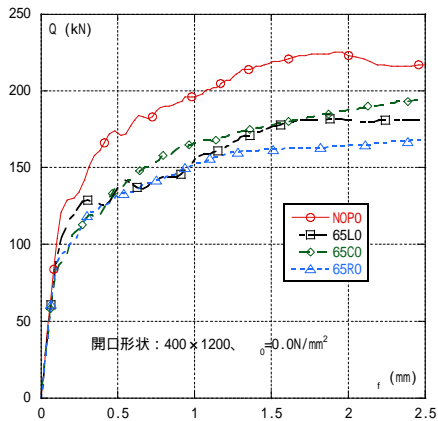


図 - 8 荷重～曲げ変形関係 1

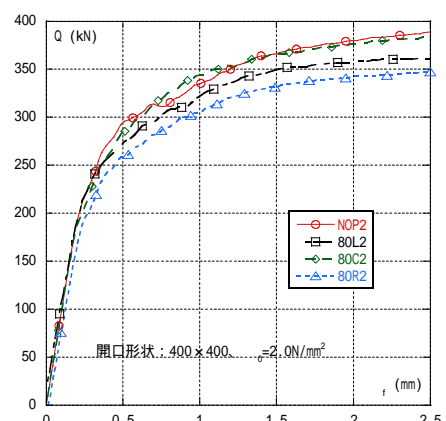


図 - 11 荷重～曲げ変形関係 4

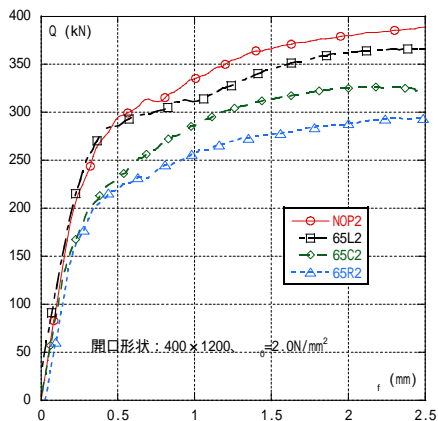


図 - 9 荷重～曲げ変形関係 2

より、ドア型耐震壁の曲げ挙動を的確に表現できるものと考えられる。

### 3 パラメトリック解析

#### (1) 解析諸元

解析諸元を表 - 2 に、開口が中央に位置する場合の解析モデルを図 - 7 に示す。解析モデルは、開口が壁脚部より存在する。開口による低減率は、0.65 と 0.80 の 2 水準である。この他のパラメーターは軸力の有無 ( $\sigma_o = 0.0$ ,  $2.0\text{N/mm}^2$ : 全断面積に対して) と開口の平面上の位置であり、開口が引張側端部 (L), 中央 (C), 圧縮側端部 (R) に位置する場合を対象とした。解析ケースは無開口 2 ケ

ースを加え、計 14 ケースである。有開口の解析モデルの名称は、最初の二桁の数字が開口低減率の 100 倍、次のアルファベットが開口位置、最後の数字が軸方向応力度を表している。

(2) 解析結果

解析結果よりせん断力～曲げ変形関係を算定し、図 - 8 ~ 1 1 に示す。この算定方法は、「3.2 解析仮定の検証」に記した方法と同じである。

図を見ると、有開口が無開口よりも同変位時の荷重が大きい部分があるが、これは、不釣り合い応力の解放によって生じたもので、変位または荷重増分量の大きさに関与する解析上の誤差である。開口形状が 400 × 1200 (開口低減率：0.65) の場合は、無開口からの曲げ剛性、曲げ終局強度の低下が大きいことが分かる。この中で、軸方向応力度が 0.0N/mm<sup>2</sup> の場合は開口位置による挙動主に曲げひび割れ強度、曲げひび割れ後の曲げ剛性、曲げ終局強度) 差が比較的小さく、2.0 N/mm<sup>2</sup> の場合は開口位置によって挙動が異なっている。一方、開口形状が 400 × 400 (開口低減率：0.80) の場合は、全体的に無開口とほぼ同様な挙動を示している。特に、軸方向応力度が 2.0N/mm<sup>2</sup> の場合の差異は僅かであり、開口位置が中央である場合は、無開口とほとんど同じ関係を描いていることが分かる。

(3) 解析結果の検討

ここでは、開口による曲げ挙動への影響として、初期曲げ剛性、曲げひび割れ強度 (せん断力～曲げ変形関係において、最初に剛性が大きく変化する時の荷重)、曲げ降伏強度 (せん断力～曲げ変形関係において、荷重がほぼ一定となる  $\sigma = 1.5\text{mm}$  時の荷重)、および曲げ終局強度 (解析の最大荷重) の無開口に対する低下割合に関し、開口位置をパラメータとして検討した。各項目の無開口に対する比と開口位置の関係を図 1 2 ~ 1 5 に示す。

- ・初期曲げ剛性 (図 1 2): 開口による初期曲げ剛性への影響は概して小さく、最も小さい剛性比でも、0.9 を上回る。開口位置に対する変動傾向は、開口が端部に位置する場合、引張端と圧縮端の剛性比はほぼ同じで約 0.94 であり、これには開口低減率の影響は小さい。しかし、開口が中央に位置する場合の剛性比は、開口低減率 0.65 で 0.9 に低下するが、開口低減率 0.80 の場合は逆に 1.0 に増大する。
- ・曲げひび割れ強度 (図 1 3): これは、開口低減率 0.65 で開口位置が中央と圧縮端である場合、強度比が 0.75 を下回っており、大きな影響があることが分かる。一方、開口低減率 0.80 の場合、軸方向応力度 0.0N/mm<sup>2</sup> では開口位置が引張端から圧縮端に移動するとともに強度比が増大している。軸方向応力度 2.0N/mm<sup>2</sup> の場合は、

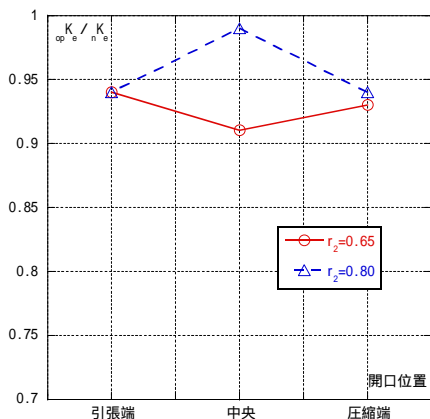


図 - 1 2 初期曲げ剛性低下率の変動傾向

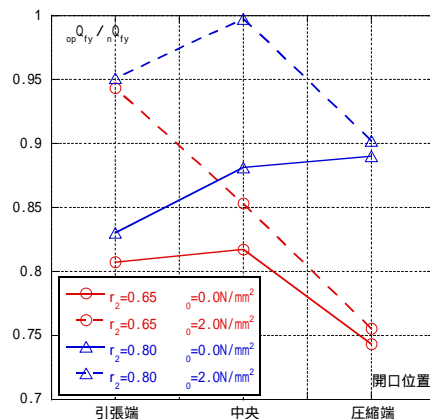


図 - 1 4 曲げ降伏強度低下率の変動傾向

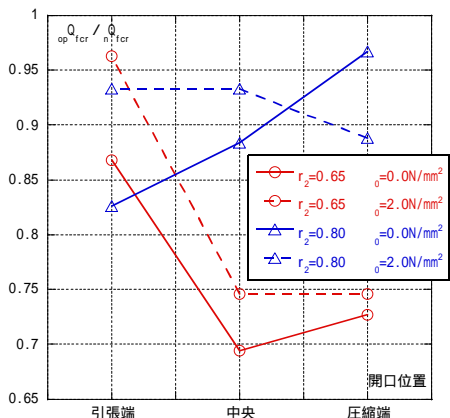


図 - 1 3 曲げひび割れ強度低下率の変動傾向

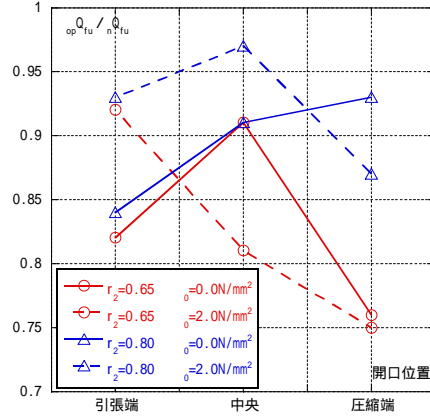


図 - 1 5 曲げ終局強度低下率の変動傾向



開口位置が圧縮端の場合のみ強度比がやや小さくなっている。この結果は、ドア型開口を有する耐震壁では、場合によっては、設計で想定しているよりも低い荷重で曲げひび割れが生じる可能性が高いことを示唆している。このような耐震壁を有する建物では、耐震壁の剛性変化に伴い、中小地震時の応答が設計での想定と異なる可能性がある。このことから、ドア型有開口耐震壁の曲げひび割れ強度算定法の開発は急務であると考え。今回の検討から、開口高さによっても強度比は変化することから、強度算定法は、曲げモーメントが大きい位置の断面のみの算定法ではなく、高さ方向の因子も考慮した算定法が必要であると思われる。

・曲げ降伏強度(図 14): 開口低減率 0.65 で軸方向応力度  $0.0\text{N/mm}^2$  の場合、強度比は全般的に小さく、開口位置が圧縮端の場合は 0.75 程度になる。軸方向応力度  $2.0\text{N/mm}^2$  の場合は、開口位置が引張端から圧縮端へ移行するに伴い強度比が低下し、圧縮端では 0.75 程度になる。これらの傾向は、石川、河野らの実験結果とほぼ対応する。開口低減率 0.80 で軸方向応力度  $0.0\text{N/mm}^2$  の場合、開口位置が圧縮端から引張端へ移行するに伴い、強度比は低下し、引張端で 0.83 程度になる。軸方向応力度  $2.0\text{N/mm}^2$  の場合は、比較的強度比は大きく、ほぼ 0.9 を上回る。これらの結果から、ドア型開口の曲げ降伏強度は、開口の形状、大きさ、位置、そして軸方向応力度の大きさの影響を受け、様々に変化することが分かる。これは、このような耐震壁を有する建物を仕様規定型設計法で設計する場合、保有水平耐力が不足する可能性があること、動的応答計算に基づいて設計する場合には大地震時の応答が設計での想定と異なる可能性があることを示唆している。このことから、ドア型開口を有する耐震壁の曲げ降伏強度算定法の開発も急務であると考え。この算定法も、曲げひび割れ強度と同様に、高さ方向の因子を考慮した算定法が必要であると思われる。

・曲げ終局強度(図-15): 傾向は、ほぼ曲げ降伏強度の場合と同様である。

#### 4. まとめ

ドア型開口を有する耐震壁の曲げ挙動に関し、既往実験結果と FEM 解析を用いて検討した。検討の結果、得た知見を以下にまとめる。

- ・初期曲げ剛性も無開口耐震壁から低下するが、その割合は比較的小さいことが分かった。
- ・曲げひび割れ強度、曲げ降伏強度、曲げ終局強度は、開口の形状や位置、その他の条件によって変動し、その値は、無開口耐震壁に比べかなり小さくなる可能性があることが分かった。よって、これら算定法の開発は急務であると考え。この際、高さ方向の因子も考慮する必要があると思われる。

今後、開口による曲げ挙動の変動要因を実験と解析により検討し、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。

#### 参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, 日本建築学会
- 2) 中西三和, 安達洋, 白井伸明: 鉄筋コンクリート造有開口連層耐震壁の強度と剛性, コンクリート工学, Vol.4, pp.413-416, 1982
- 3) 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, Vol.33, No.2, pp.463-468, 2011.7
- 4) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 5) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 6) 萩尾浩也, 木村耕三, 勝俣英雄: CFRP 板を用いた既存耐震壁の新規開口補強に関する研究, コンクリート工学, Vol.28, No.2, pp.1543-1548, 2006.7