

# 論文 RC 造有開口耐震壁の弾塑性骨組解析モデルの最大耐力とその時の変形機構に及ぼす開口の大きさと位置の影響の検討

白石 芽依\*1・加藤 大介\*2・中村 孝也\*3

**要旨:** RC 構造の設計において弾塑性解析に用いられる 4 種類の解析モデルの適用性をパラメトリックに検討した。検討対象の解析モデルは、現在骨組モデルおよび壁モデルとして慣用的に使われている材端曲げばねモデルと 3 本柱モデルの他に、離散ばねモデルと分割 3 本柱モデルである。有開口耐震壁の開口周比と開口位置を変化させ最大耐力とその時の変形機構の比較を行った。その結果、分割 3 本柱モデルは開口の位置による影響を表現可能で、材端曲げばねモデルは開口周比は 0.5 以上の場合に最大耐力および変形機構が適切に表現できるが、開口周比が 0.4 の偏在開口の場合に、最大耐力を過大評価することが分かった。

**キーワード:** RC 造, 構造設計, 有開口耐震壁, 離散ばねモデル, 3 本柱モデル

## 1. はじめに

現在の構造設計において、RC 造建物の耐震壁に開口がある場合、面積開口周比  $\xi$  (後述する図-3 参照) が 0.4 以下のときは、せん断強度を開口低減率  $(1-\xi)$  により低減した上で無開口壁と同様に扱い、それ以外は骨組と扱うことが慣用的に行われている<sup>1)</sup>。しかしながら、日本建築学会の保有耐力指針<sup>2)</sup>では、開口の大きさにはとらわれずに、壁的な挙動の場合には壁のモデルを骨組的な挙動の場合には骨組みモデルを適用するべきと解説されている。すなわち、本来開口の大きさや位置に依存せず連続的なモデルを適用することが望ましく、従来の考え方にとらわれずに、開口がある場合の適切なモデル化を提案する必要がある。

筆者らは過去に曲げ降伏型の連層有開口耐震壁の静耐力実験を行い、開口の大きさと位置が強度と変形能に与える影響を検討してきた<sup>3)</sup>。また、文献 4) で有開口壁の解析モデルの実験との対応を比較検討した結果の概要を報告している。しかしながら、試験体の数は限られており、より一般的な結論を導くためには多くのパラメータを変化させた検討が必要である。そこで、本研究では開口の偏在度  $\lambda$  (後述する図-3 参照) および面積開口周比  $\xi$  をパラメトリックに変えた数値実験を行った。最終的には構造設計で用いることのできる有開口耐震壁の弾塑性解析モデルを提案することを目的としている。

## 2. 有開口壁のモデル化における問題点

図-1 は文献 3) で示した有開口壁の挙動の概念図である。図-1 (a) は連層の有開口壁の力の伝達をストラット & タイで表現しているが、簡略化のために 1 階部分のみ詳細にモデル化し、2 階の開口は無視し梁とともに剛と仮定している。その要点は開口の両側に圧縮ストラット

が形成され、それにより最大耐力と終局変形が影響される点である。それを極端なケースで示したものが図-1 (b) (c) であり、それぞれ、全せん断力が圧縮側ストラットあるいは引張側ストラットで伝達される場合である。文献 3) では前者を Type-F と呼んでおり、この場合は無開口壁と同じ挙動が得られる。すなわち、層間変形角  $\theta$  と耐震壁の変形角  $\theta_f$  の関係、および、耐震壁の降伏モーメント  $M$  と無開口耐震壁の降伏モーメント  $M_y$  の関係は式 (1) で表される。

$$\theta_f = \theta \quad M = M_y \quad (\text{Type-F}) \quad (1)$$

$$\theta_f = (1 - \alpha)\theta \quad M = \frac{(1-\alpha)}{(1-\alpha-\alpha\beta)} M_y \quad (\text{Type-FS}) \quad (2)$$

一方、問題は後者の Type-FS である。この場合、耐震壁としての変形角  $\theta_f$  および降伏モーメント  $M$  は無開口耐震壁に比べ小さくなる。文献 3) ではこの関係を略算的に式 (2) で評価している。ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  は図-1 に示してあるが、それぞれスパンの長さに対する引張側ストラットの位置を表す指標、壁高さに対する最下層の高さを表す指標、である。 $\theta_f/\theta$  の値は、弾性の片持ち梁を想定し曲げ変形のみ考慮すれば 1.5、危険断面に曲げヒンジを有

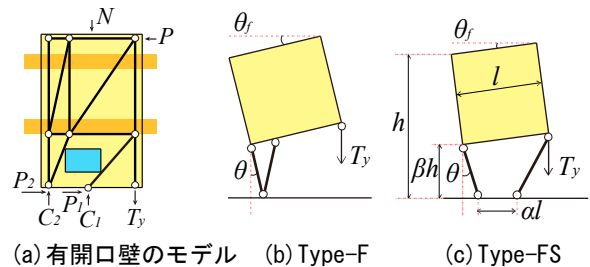


図-1 有開口壁の挙動の概念図<sup>3)</sup>

\*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 建築学コース(学生会員)

\*2 新潟大学 工学部建築プログラム教授 工博 (正会員)

\*3 新潟大学 工学部建築プログラム准教授 博士(工) (正会員)

表-1 試験体諸元

試験体名		WN01 <sup>3)</sup>	WS01 <sup>3)</sup>	WS03 <sup>3)</sup>	WS04 <sup>3)</sup>	
壁	壁厚 (mm)	75				
	内法 (mm)	800				
	開口	周比	0.31	0.41		
		形状	窓型		戸型	
		位置	中央		偏在	
偏在係数 λ		(+)	1.00		1.12	
	(-)			0.88		
柱	断面 (mm)	150×150				
梁	断面 (mm)	150×150				
シアスパン (mm)		1900				
実験結果	最大強度 (kN)	(+)	147	146	161	146
		(-)				131
	θ <sub>f</sub> /θ	(+)	0.95	0.77	0.82	0.62
		(-)				0.99

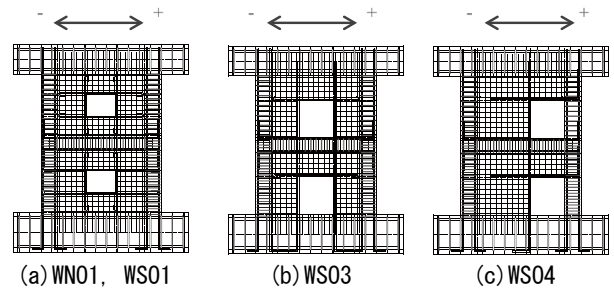


図-2 配筋図

開口形状	窓型開口										戸型開口									
	0.2		0.3			0.4					0.5		0.6			0.7		0.8		0.9
開口周比(ξ)	1.00	0.87	0.94	1.00	1.06	1.13	0.9	0.95	1.00	1.05	1.11	1.00	1.00	0.88	0.93	1.00	1.06	1.12	1.00	
偏在係数(λ)																				

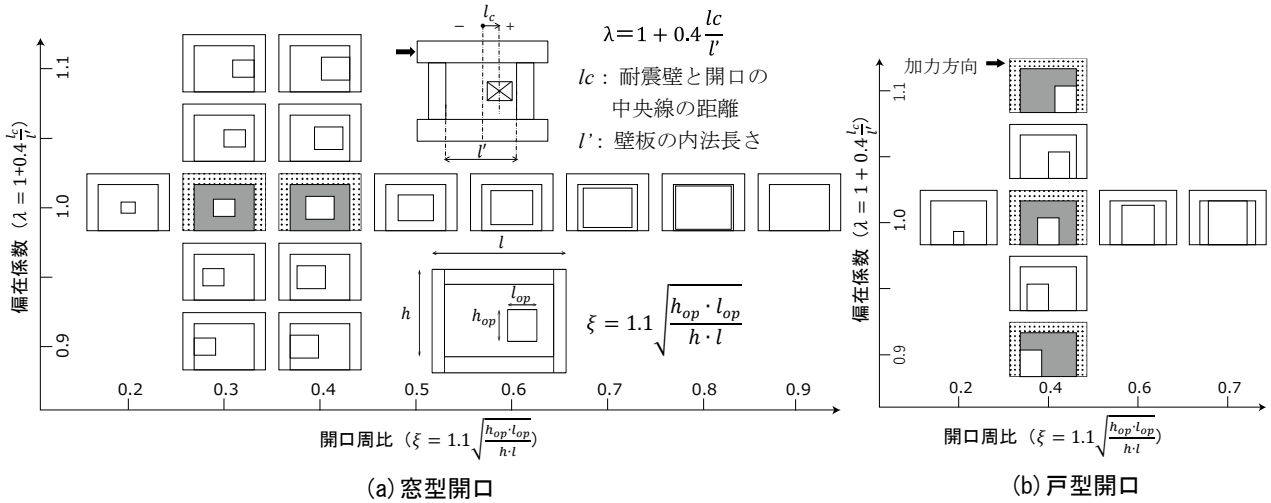


図-3 検討した開口周比ξと偏在係数λ (1層のみ表現、塗りつぶしは実験を行った試験体)

する剛体であれば 1.0 となる。一方、部材のせん断変形が含まれると値が減少し、せん断変形のみで 1 層の変形が構成されると  $\theta_f/\theta$  の値は 0 となる。図-1(c) に示した変形機構は部材のせん断変形と同じ意味を有するので、この見かけ上のせん断変形が卓越すると  $\theta_f/\theta$  の値は 0 に近づくことになる。この値は耐震壁周辺の梁の変形を支配するものなので、特に曲げ降伏する連層壁の場合はその評価が重要となる。実験では偏在開口の柱圧縮側の加力で小さな値になることが示されており、現在耐震壁の解析モデルとして慣用的に用いられている 3 本柱モデル<sup>1)</sup>はこの幾何学的な条件による低減を考慮することができないという点で問題がある。

### 3. 解析対象

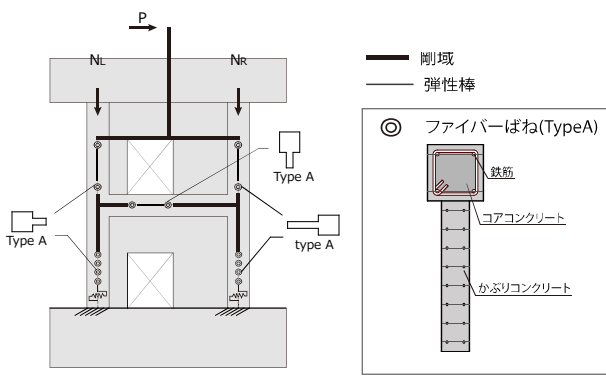
解析対象は文献 4) で対象とした試験体のうち表-1 に示した 4 体を原型とし、開口周比と開口の偏在の度合いを変化させた。図-2 に原型試験体の配筋図を示しておく。いずれも曲げ降伏した片持ち柱加力形式の連層有開口試験体である。図-3(a)(b) は解析対象とした試験体の

一覧とそれを図示したものである。図は横軸に開口周比ξ、縦軸に偏在係数λをとっており、1 層部分のみの姿図を示している。図中にはξとλの定義も示してある。また、塗りつぶしされている試験体は表-1 に示した実験が行われているものである。

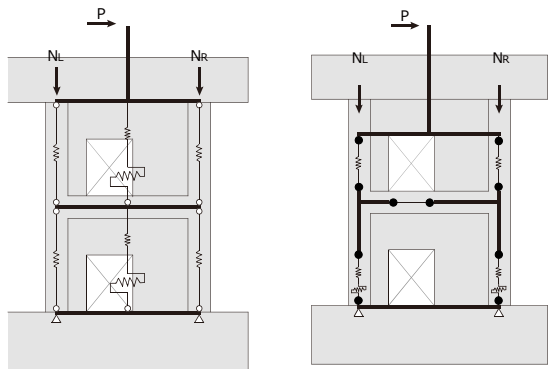
### 4. 検討した解析モデル

検討した解析モデルは、現在慣用的に用いられている壁用のモデルである 3 本柱モデルと骨組用のモデルである材端曲げばねモデルの他に、開口の大きさと位置を連続的に評価できる分割 3 本柱モデルおよび複雑であり構造設計には適さないが実状に最も近いと考えられる離散ばねモデル、の 4 種類である。

図-4(a)~(d) に偏在開口の開口周比ξ=0.4、偏在係数λ=0.93 を対象に検討した 4 通りの解析モデルを示す。また、同様に図-5(a)~(d) には中央開口の試験体 WN01 (ξ=0.3、偏在係数λ=1.0) を対象に検討した 4 通りの解析モデルを示す。いずれのモデルも線材置換した場合の接合部にあたる部分を剛域と設定している。

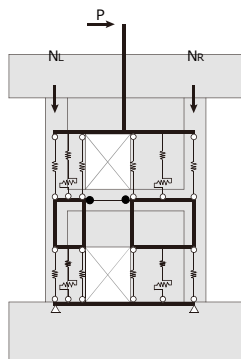


(a) 離散ばねモデル



(b) 3本柱モデル

(c) 材端曲げばねモデル



(d) 分割3本柱モデル

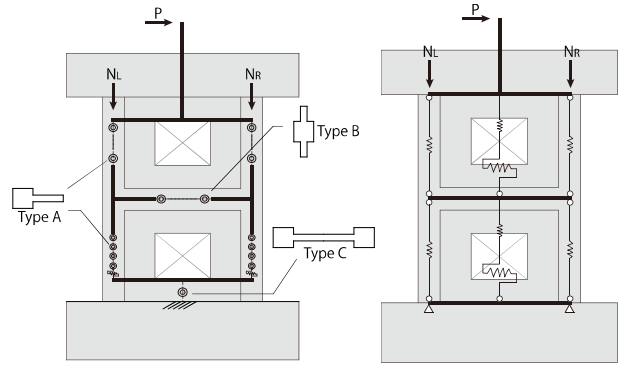
図-4 偏在戸型開口の解析モデル ( $\xi=0.4$ ,  $\lambda=0.93$ )

本報告ではいずれも水平力加力点の水平変位を制御して増分解析を行っている。以下にその概要を示す。なお、せん断ばねは共通なので、まとめて4.5節で示している。

#### 4.1 離散ばねモデル

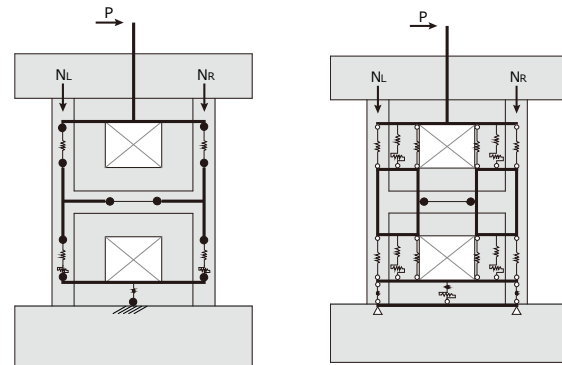
「離散ばねモデル」は有開口耐震壁を骨組に置換し、それぞれの部材に平面保持を仮定したばねを材軸方向に並べたものである。それぞれのばねで荷重ステップ毎に軸力—曲げモーメントの相関関係が考慮できるので、開口左右の部材の挙動を現実的に評価することができ、開口の大きさや位置の影響を適切に表現できると考えられるモデルである。

図-4(a)および図-5(a)に示すように、1層の鉛直部材の挙動に着目し、そこだけ4領域に分割し離散ばねを設け、簡略化のためにその他の2層部分の部材は危険断



(a) 離散ばねモデル

(b) 3本柱モデル



(c) 材端曲げばねモデル

(d) 分割3本柱モデル

図-5 中央開口の解析モデル ( $\xi=0.3$ ,  $\lambda=1.0$ )

面のみを離散ばねとし、中間は弾性ばねとしている。この試験体では離散ばねは3種類に分類され、それぞれ図中にTypeA~Cとして示してある。いずれも平面保持を仮定したファイバーモデルである。TypeAは片側袖壁付き柱(梁)、TypeBは両側袖壁付き柱、TypeCは両側柱付き壁である。いずれもコンクリートは柱のコアを拘束コンクリートとし、かぶりおよび袖壁部分は無拘束コンクリートとしている。それぞれの応力度—ひずみ度関係は文献5)によっている。鉄筋は降伏後剛性低下率を0.001としたバイリニアールである。

窓型開口壁への適用であるが、開口の下に腰壁がつくような窓型開口ではその腰壁部分の評価が難しい。本報告では図-5(a)に示すように、耐震壁としての危険断面にばねを設けている。

#### 4.2 3本柱モデル

図-4(b)に示す「3本柱モデル」は壁と判定されたときに慣用的に用いられているモデルであるが、開口の位置の影響を取り入れられないモデルである。このモデルは中央の壁板部分のモデル化が難しい。文献1)では上下に曲げばねがとりつくものも紹介されているが、いずれにせよ耐震壁の曲げモーメント分布が想定したものと異なる場合には結果が大きく異なり、実務的には最終的にそれを確認する必要がある。本報告では片持ち柱の加力形式なので、危険断面での曲げ強度が正しく評価できる

ことを優先した。すなわち、中央の壁板は下部ピン上部固定とし、軸方向は袖壁部分の全縦筋を対象にした弾塑性ばね、曲げに対しては弾性とした。

側柱の軸ばねは、引張側はコンクリートのひび割れ点と側柱の全主筋の降伏で決まるトリリニアールで、降伏時の軸ひずみ度は0.2%とした。圧縮側もトリリニアールであるが、全主筋の降伏強度とコンクリートの圧縮強度の和を圧縮強度としそのときのひずみ度は0.2%とし、第一折れ点は圧縮強度の1/3としている。

図-5(b)に示したように開口の位置や大きさが変わってもモデル自体はおよび図-5(a)と変わらない。

#### 4.3 材端曲げばねモデル

「材端曲げばねモデル」は骨組と判定されたときに慣用的に用いられているモデルで、壁の場合でも開口の周りを骨組と解釈すれば、一般的な線材と同様に扱うことにより形式的に適用できる。しかしながら、加力ステップごとに変化する部材の軸力に対する曲げモーメントの変動を簡単には考慮できない点、部材の曲げモーメント分布が逆対称から大きく外れるときに精度が悪くなる点、あるいは袖壁が取りつくときの軸心の設定法が難しい。

また、このモデルを用いた解析プログラムは一般的に断面1次モーメントを無視しているため、部材の図心に軸心を設定するのが正しい適用法である。それ以外の場所に軸心を設定すると軸方向の変形状態が大きく異なってくることに注意を要する。本モデルでは図-4(c)に示すように、柱と梁芯に軸心を設定しているが、この適用法は好ましくないと考えられる。しかしながら、有開口壁を連続的に捉えるという観点では重要なモデルなので、ここでは対象としている。

材端ばねのモーメント-回転角関係であるが、一般的な梁・柱を対象にしたものと同じ手法を用いた。すなわち、軸力は柱軸心に作用するとして曲げ強度は軸心周りの強度を与えている。第一折れ点は曲げ強度の1/3としている。また、降伏時の回転角は部材が逆対称曲げを受けた時に割線剛性低下率 $\alpha_y$ が0.3となるように設定した。

なお、このモデルは前述したように逐次変化する軸力一曲げモーメントの相関関係を考慮できない。そのため、あらかじめ終局時に想定される軸力を想定し曲げ強度を評価しておくこともよく行われる。本報告においてもあらかじめ終局時に想定される軸力を用いて曲げ強度の評価を行っている。

#### 4.4 分割3本柱モデル

図-4(d)に示すように、有開口壁を開口左右と上下の部材に分割した上で、袖壁部分に3本柱モデルを適用している。袖壁端部は壁厚×壁厚の仮想柱を設定したが、袖壁長さが少なくその中に正方形の柱型が設定できない場合は独立柱として扱うことになるため、モデルは作成し

ていない。また、独立柱部分は材端曲げばねモデルと同様にあらかじめ終局時に想定される軸力を用いて曲げ強度の評価を行っている。なお、梁は垂壁付きとなっているが、ここでは簡略化のため独立柱と同じく材端曲げばねモデルとした。一方、窓型開口壁への適用であるが、図-5(d)に示すように、離散ばねモデルと同様に耐震壁としての危険断面にばねを設けている。

このモデルは実務的にも十分適用可能なモデルであるが、線材となった部分では前述した材端曲げばねモデルと同じ問題が生じる。

#### 4.5 せん断ばねの設定方法

袖壁が取り付く場合はそのせん断変形成分は無視できない。そこで、分割3本柱モデルと3本柱モデルは当然であるが、離散ばねモデルと材端曲げばねモデルにおいても袖壁付の部材となる場合はせん断ばねを設けている。なお、1層の挙動に着目しているため、影響の大きい1層のみ考慮している。

せん断ばねの初期剛性はそのばねが代表する断面積を長方形に置換して算出している。壁全体のせん断強度は文献1)による平均的な強度を与える実験式より求め、開口低減率 $\beta$ を適用している。せん断ばねが左右の部材で別れる場合には、その断面積比で配分した。また、ひび割れ強度はせん断強度の1/3、割線第2剛性低下率は1/3としている。

### 5. 解析結果

解析結果における最大耐力であるが、離散ばねモデル以外は耐力低下を生じないので、文献4)では各モデルの最大耐力を対応する実験での最大耐力時の変形角での水平力としていた。そこで、実験値のないこれらの解析値の最大耐力としては、耐力低下が起こるモデル(離散ばねモデル)ではその耐力、モデルのどこかの要素がせん断破壊した場合はその時の耐力、それ以外の場合は文献4)の実験値の平均である1.2%時の水平力として評価した。なお、前述したように独立柱に関してはせん断ばねを設けていない。そこで、独立柱に関しては別途せん断力とせん断強度を比較し、せん断力がせん断強度を上回った場合にはせん断破壊と判定している。以下に各解析結果について示す。

#### 5.1 荷重-変形角関係

図-6(a)～(c)に試験体の加力点における荷重-変形角関係の例を示す。なお、実験のある試験体WNO1,WSO3,WSO4(+,-)の解析結果は文献4)で報告したので、ここでは割愛する。また、本報告では最大耐力までの範囲で検討する。

図-6(a)は実験値のある中央窓型開口のWSO1の解析結果であるが、材端曲げばねモデル以外はほぼ最大耐力

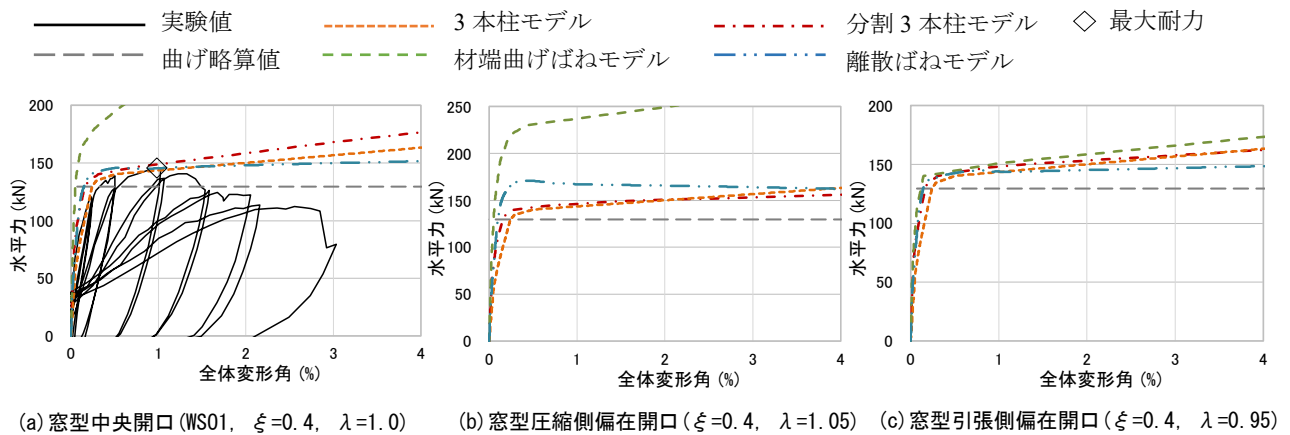


図-6 水平力-全体変形角の解析結果の例

まで実験値を追跡できている。材端曲げばねモデルは実験値を過大評価している。この理由としては、文献4)でも報告したように解析が実験における最大耐力時の部材の応力状態を再現できていないことが主である。

図-6(b)は試験体 WSO1 の開口を偏在させて圧縮側にした ( $\lambda=1.05$ ) 解析モデルである。解析モデルによる違いが大きく、材端ばねモデルは大きく過大評価となっている。図-6(c)は試験体 WSO1 の開口を偏在させて引張側にした ( $\lambda=0.95$ ) 解析モデルである。解析モデルによる違いはなくなり、ほぼ同じような挙動になっていることがわかる。

## 5.2 開口周比 $\xi$ の影響に関する検討

本節では開口周比  $\xi$  をパラメトリックに変えた場合の最大耐力と図-1(b)(c)で定義された  $\theta_f/\theta$  について検討する。解析結果は対応する実験値がないので、文献4)で最も実験値に近い挙動となることが報告されている離散ばねモデルを正解とし、それを基準に他のモデルの適用性を議論する。なお文献4)での離散ばねモデルの適用性は開口周比 0.2~0.5 で確認されたものであるが、純フレームに近ければ(開口周比>0.5)であればその適用に問題はなく、無開口に近くても(開口周比<0.2)平面保持的な挙動になるので、その適用に問題は無いと判断できる。

図-7(a)(b)は開口周比  $\xi$  をパラメトリックに変えた場合の窓型開口と戸型開口の最大耐力および  $\theta_f/\theta$  の解析結果である。試験体は中央開口 ( $\lambda=1$ ) のもののみを示している。また、図は基準としている離散ばねモデルのみを破線で結び、他の解析結果と比較できるようにしている。また、いずれかの要素がせん断破壊した解析ケースは記号を塗りつぶして示している。

窓型開口の場合、図-7(a-1)より開口周比  $\xi$  が大きくなるにつれて各モデルの最大耐力が小さくなるが、材端曲げばねモデルでは開口周比 0.4 以下で離散ばねモデルを過大評価するが、それ以上では概ね一致していること、3本柱モデルでは開口周比 0.6 以下では一致しているが、

それ以上開口が大きくなると離散ばねモデルから離れることがわかる。また、分割3本柱モデル(前述したように開口周比 0.7 以降はモデル化できない)は離散ばねモデルとほぼ同様の挙動を示している。

戸型開口の場合、図-7(b-1)より開口周比  $\xi$  が大きくなるにつれて窓開口の場合と同様に各モデルの最大耐力が小さくなるが、窓型開口ほど極端ではない。

一方、 $\theta_f/\theta$  であるが、窓型開口の場合(図-7(a-2))、材端曲げばねモデルと分割3本柱モデルは離散ばねモデルと同様の挙動を示しているが、3本柱モデルは開口周比が 0.7 より大きくなると全く違う挙動となる。図-7(b-2)は戸型開口の場合であるが、離散ばねモデルに対し、他の3つのモデルは適切に挙動を表していないことがわかる。

## 5.3 偏在係数 $\lambda$ の影響に関する検討

本節では偏在係数  $\lambda$  をパラメトリックに変えた試験体の最大耐力および  $\theta_f/\theta$  について検討する。図-8(a)~(c)は偏在係数  $\lambda$  をパラメトリックに変えた場合の窓型開口(開口周比が 0.3 と 0.4)と戸型開口(開口周比が 0.4)の最大耐力および  $\theta_f/\theta$  の解析結果である。また、図は基準としている離散ばねモデルの同じ開口周比のものを破線で結び、他の解析結果と比較できるようにしている。

窓型開口の場合、図-8(a-1)(b-1)より偏在係数  $\lambda$  の変化に対し、材端ばねモデル以外はほぼ同様の挙動となるが、材端ばねモデルは全体的に離散ばねモデルの過大評価となっていることがわかる。戸型開口の場合も、図-8(c-1)より材端曲げばねモデルが離散ばねモデルを過大評価しているが、特に偏在係数が大きい場合(独立柱が圧縮側)に顕著である。5.2節では戸型開口の場合、開口周比が 0.4 程度では材端ばねモデルは離散ばねモデルと大きな差はなく、窓型開口では過大評価となるケースがあることを示した。また、文献4)では「材端曲げばねモデルは全体的に誤差が大きく、特に実務で適用される開口周比が 0.4 程度のものでも強度を過大評価する」と結論付けてい



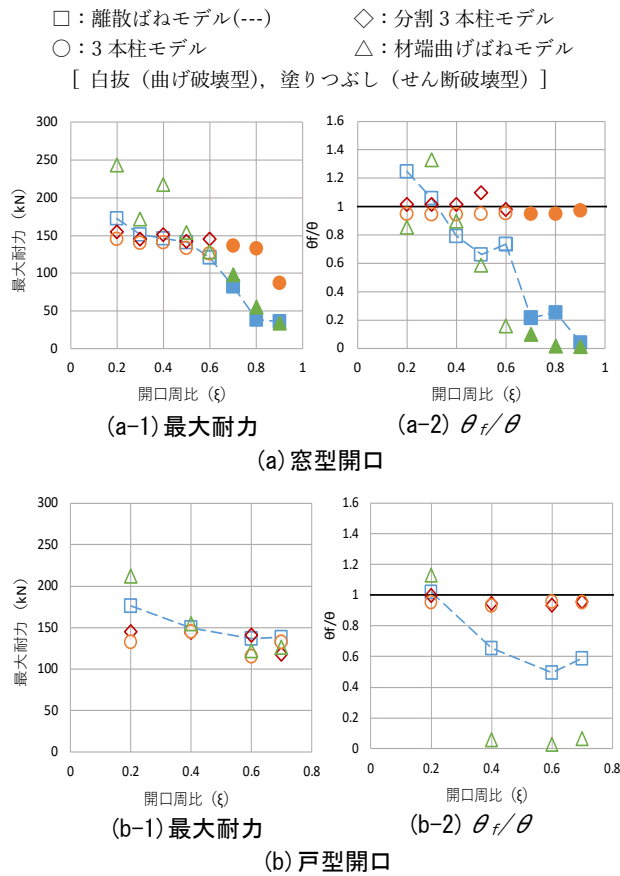


図-7 開口周比 $\xi$ の影響 ( $\lambda=1.0$ )

るが、これは特に偏在開口の場合に顕著となることがわかる。

一方、 $\theta_f/\theta$  であるが、窓型開口の場合 (図 8-(a-2) (b-2)) と戸型開口の場合 (図 8-(c-2)) の場合のいずれも離散ばねモデルの挙動自体が大きく変動し、また、他の3つのモデルもばらついており、現時点では構造設計に還元できる知見は得られていない。

## 6. まとめと今後の課題

有開口壁の4つの解析モデルを対象とし、有開口壁の開口周比および偏在係数をパラメトリックに変えた検討を4種類のモデルでそれぞれ行った。その結果、離散ばねモデルを正解と想定して評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) 分割3本柱モデルは離散ばねモデルとほぼ同程度の挙動を示した。
- (2) 3本柱モデルは開口周比が0.6以下であれば離散ばねモデルと同様の挙動を示した。また、変形機構はいずれの開口周比でも差が生じている。
- (3) 材端曲げばねモデルは窓型開口の場合、開口周比が0.5以上ならば離散ばねと同様の挙動を示したが、開口周比が0.4で開口が偏在すると離散ばねモデルの最大強度を過大評価した。

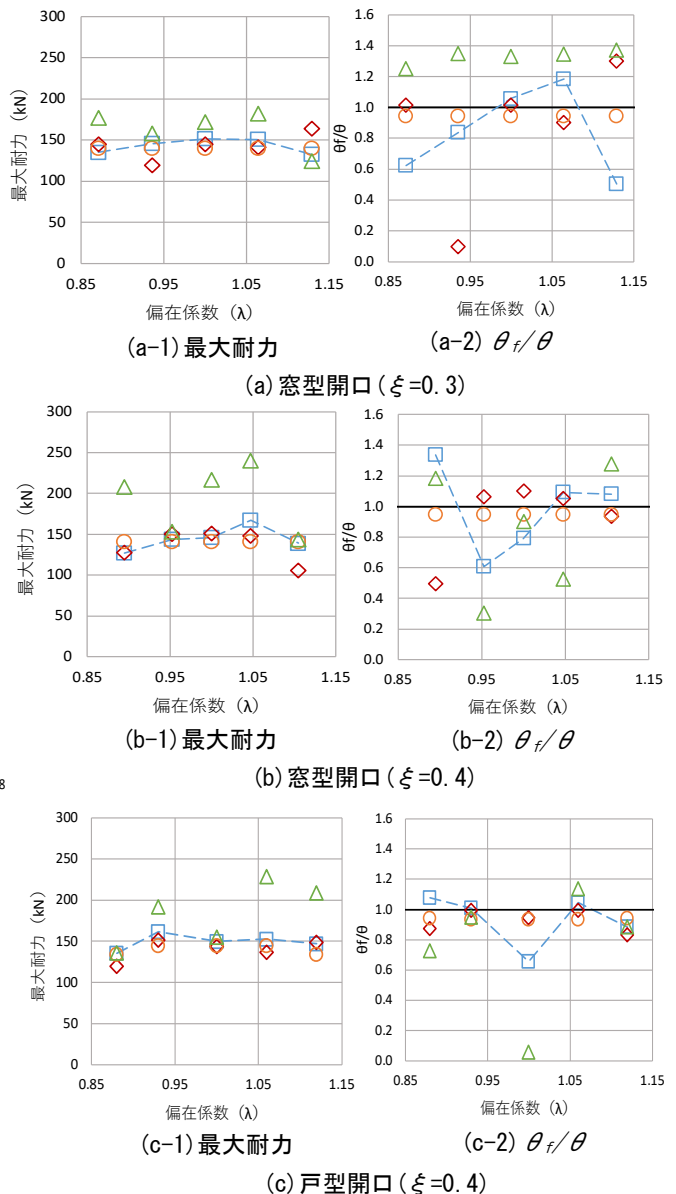


図-8 偏在係数 $\lambda$ の影響

## 参考文献

- 1) 2015年版建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2015.6
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説, 2016.4
- 3) 加藤大介, 杉下陽一, 小倉宏一, 大谷裕美: 鉄筋コンクリート造連層有開口耐震壁の変形能の評価方法, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp.107-113, 2000.4
- 4) 松原魁, 加藤大介, 白石芽依, 中村孝也: 構造設計において弾塑性骨組解析に用いるRC造有開口耐震壁の解析モデルに関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.343-348, 2019.6
- 5) 加藤大介: 配筋法を考慮した鉄筋コンクリート柱の変形能の評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第450号, pp.81-88, 1993.8