

論文 1階おきにドア開口を有する RC 耐震壁の耐震設計に関する研究

笠井 洋伸^{*1}・中村 聡宏^{*2}・勅使川原 正臣^{*3}

要旨: 1階おきにドア開口を有する5層RC造耐震壁の地震時挙動について、二次元FEM解析モデルとエレメント置換解析モデルにより比較検討を行った。奇数階、もしくは偶数階に開口を有する耐震壁それぞれの耐力、破壊形式については、両解析モデルによる大きな差は見られなかった。しかし、これらを並列させた場合は、両解析モデルによる層せん断力-層間変形角関係に、エレメント置換モデルにおける壁板の第2剛性評価に起因する差が生じた。

キーワード: 耐震壁, FEM解析, 開口低減率, エレメント置換モデル

1. はじめに

昨今、耐震改修時の補強部材設置にあわせて、住棟の有効活用の観点から、床・壁に開口を新設して2戸1改造を実施したいというニーズが高まっている。そのためには、開口を有する耐震壁の耐力や破壊性状を評価した上で、適切な耐震設計がなされなければならない。

鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下、RC規準¹⁾)では、縦開口による低減率が導入されたが、開口上下の境界梁がせん断破壊し、開口周りの壁板脚部が曲げ降伏する仮定の下に成り立つ式であるとしており、1階おきにドア開口を有する場合の剛性や強度について具体的な言及がなされていない。そこで、本研究では、水平2戸1改造を対象とし、1階おきにドア開口を有する耐震壁のエレメント置換によるモデル化手法を明らかにすることを目的とする。二次元非線形FEM解析を用いて有開口耐震壁の耐力、破壊性状等を明らかにし、エレメント置換ばねモデルでの解析結果と、特に、せん断強度と剛性に重点をおいた比較検討を行う。

2. 解析対象

解析対象は、1階おきにドア開口を有する連層壁のせん断強度・剛性を検討するため、典型的な一文字型のRC造建築物における梁間方向の連層耐震壁とし、最低限3つの開口を設けるため5層とした(図-1)。階高2600mm、天井高2000mm、スパン長さ8200mmである。開口は、開口部上端を当該階の梁に、かつ開口部の下端を当該階の床板に接するよう設置する(壁板のスパン中央位置に高さ2000mm、幅1000mm)。解析に用いたパラメータの一覧を表-1に示す。破壊形式をせん断破壊型とするため柱の主筋比は6.0%とした。なお、鉄筋の降伏強度はいずれも345N/mm²として解析を行った。

3. 二次元非線形FEM解析

*1 名古屋大学 工学部 学生(正会員)

*2 名古屋大学大学院 大学院生(正会員)

*3 名古屋大学大学院 教授・工博(正会員)

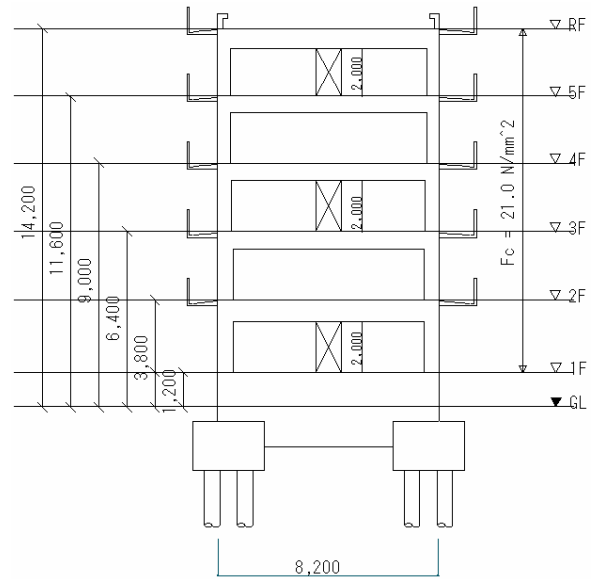


図-1 解析対象とする建物の軸組図

表-1 解析モデルのパラメータ一覧

形状 D × h (M/QD)	柱			梁		
	断面 b _c × D _c [mm]	主筋比 [%]	帯筋比 [%]	断面 b _b × D _b [mm]	主筋比 [%]	あばら筋比 [%]
8200 × 2600 (1.09)	850 × 400	6.00	0.24	300 × 600	0.86	0.42
壁厚 [mm]	壁縦横筋比 [%]		s × t [mm]	床筋比 [%]	軸力 [kN] (η)	F _c [N/mm ²]
	1層	2~5層				
150	0.30	0.237	2300 × 200	0.25	2142 (0.15)	21

D:横幅全長 h:階高 b_c:柱幅 D_c:柱せい b_b:梁幅 D_b:梁せい
s:床有効長さ t:床厚 η:柱断面に対する軸力比 F_c:コンクリート強度

3.1 解析モデルの概要

解析には市販のコンクリート構造非線形FEM解析ソフト「FINAL²⁾」を使用した。解析対象とした耐震壁の解析モデルのパラメータの一覧を図-2に示す。解析は二次元の非線形FEM解析とした。コンクリートは4節点四辺形要素に置換し、いずれの解析モデルにおいても一辺200mmの正方形を耐震壁の要素の基本寸法とした。開口

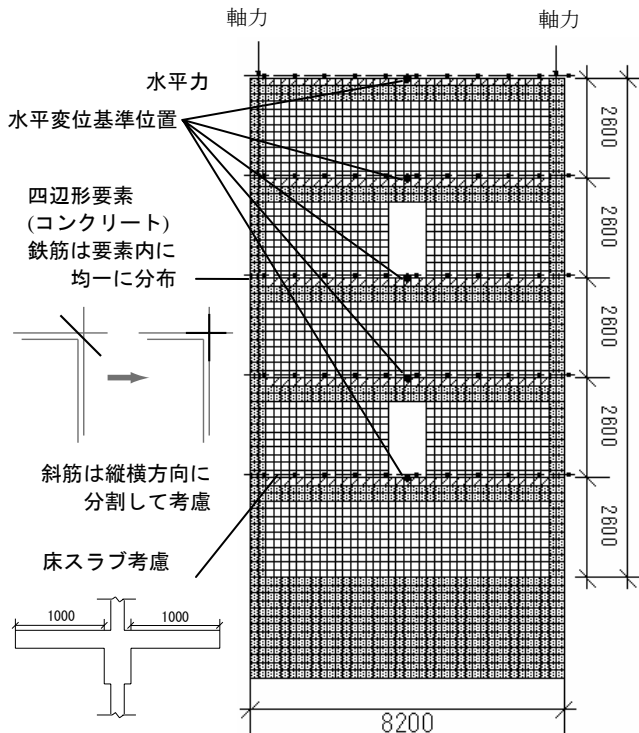


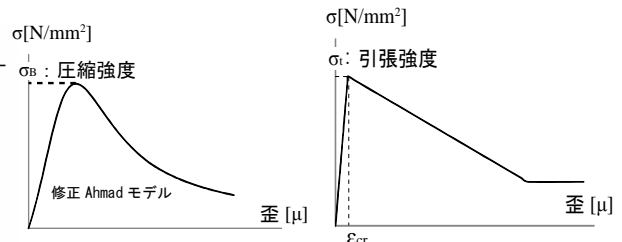
図-2 解析モデル要素分割の例
(偶数階に開口を開けた場合)

補強筋を含めた各種鉄筋は、コンクリート要素内に均一に分布する鉄筋として表現した。本解析では、せん断破壊を先行させ曲げ破壊を防止するため、また解析を簡略化するため、軸方向力は最上階柱芯位置に作用させた。地震荷重は逆三角形分布として各層の梁芯位置に分布荷重で与え、一方向荷重増分解析を行った。また、基礎梁底面における節点の水平、鉛直方向の自由度を拘束した。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性体とし、ひび割れは要素内に一様に分布し、多方向のひび割れが考慮できる非直交分散ひび割れモデル³⁾により表現した。コンクリートの構成則を図-3に示す。圧縮側は修正 Ahmad モデル⁴⁾を用い、平面応力下の破壊条件として Kupfer らの提案⁵⁾に従った。引張側はひび割れ発生後の tension stiffening 特性を考慮し、長沼らの提案⁶⁾に従った。また、コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性には、長沼の提案モデル⁷⁾を用いた。鉄筋の応力-ひずみ関係は bi-linear モデルとした。開口補強筋は縦筋、斜筋ともに 1-D25 とした。要素内で斜筋は縦横筋に加えた。なお、解析モデルで各層の梁は有効幅を片側 1m ずつとしたスラブ付梁とする。

3.2 解析結果

無開口耐震壁、偶数階に開口を設けた耐震壁、奇数階に開口を設けた耐震壁(以下、無開口、偶数階開口、奇数階開口と呼ぶ)の FEM 解析で得られた 1 層層せん断力と全体変形角(建物頂部の変形/建物の高さ)の関係と比較したものを図-4に示す。ここで、FEM 解析は、荷重増分による制御を行ったため、最大荷重近傍で変位のみが



(a) 圧縮側応力-歪関係 (b) 引張側応力-歪関係

図-3 コンクリート構成則

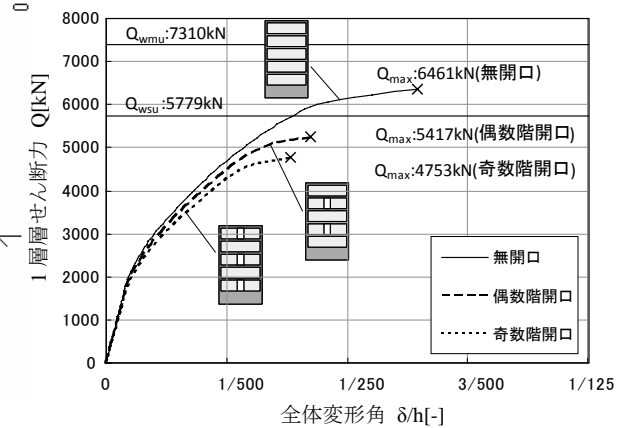


図-4 1層層せん断力と全体変形角の関係

急増した。そのため、本解析による最大耐力は、不釣合力の収束計算が不安定になる直前の耐力とした。なお、広沢式(式(1))による計算値は 5779kN であり、無開口耐震壁の FEM 解析で得られた最大耐力と(1)式による計算値の比(Q_{max}/Q_{wsu})は 1.11 である。

$$Q_{wsu} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/(QD)} + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e j \quad (1)$$

記号の説明、算定法は文献 8)を参照のこと

偶数階開口のせん断耐力は奇数階開口のせん断耐力よりも高くなっている。

偶数階開口、奇数階開口それぞれの FEM 解析により得られた最大耐力時の各層層せん断力-層間変形角関係を図-5に、最大耐力時のひび割れ損傷状況を図-6に示す(図-6で白い要素は圧縮軟化域)。図-5では、1層の層間変形角が 1/1000、1/500 の時、最大耐力に達した時の各層層間変形角を直線で結んでいる。偶数階開口では開口のある 2 層で、奇数階開口では開口のある 1 層での変形が大きく進み、その層の壁板のひび割れが広がった。

3.3 開口低減率による耐力評価

開口低減率を RC 規準¹⁾に基づき式(2)~(4)で求めた。

$$\gamma = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$$

$$\gamma_1 = 1 - 1.1 \times \frac{l_{op}}{l} \quad (2)$$

$$\gamma_2 = 1 - 1.1 \times \sqrt{\frac{h_{op} l_{op}}{hl}} \quad (3)$$

$$\gamma_3 = 1 - \lambda \frac{\sum h_0}{\sum h} \quad (4) \quad \lambda = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{l_0}{l} \right) \quad (4-a)$$

各記号の説明，算定法は文献1)を参照のこと

FEM 解析により得られた最大耐力 Q_{max} から，偶数階開口，奇数階開口それぞれの場合の開口低減率 γ_{FEM} (=FEM 有開口最大耐力/FEM 無開口最大耐力)を求める。また，偶数階開口では，2層で破壊するため，1層を固定した4層無開口耐震壁を仮定し，新しくFEM解析で得られた無開口耐震壁の ${}_2Q_{max}$ が2層のせん断耐力であると考え計算を行う。なお，4層無開口耐震壁のFEM解析で得られた最大耐力は6554kNとなった。

γ_{FEM} ， γ_1 ， γ_2 ， γ_3 を比較したものを表-2に示す。表-2より， γ_{FEM} は，偶数階開口が奇数階開口より大きい値となっているが， γ_1 や γ_2 では偶数階開口，奇数階開口ともに同値になった。 $\gamma_1 \sim \gamma_3$ の最小値である γ_2 は安全側の評価となっている。RC規準¹⁾では， γ_3 は開口上下の境界梁がせん断破壊し，開口周りの壁板脚部が曲げ降伏する仮定の下，成り立つ式であり，今回のケースには当てはまらないとされているが，FEM解析の結果から得られた開口低減率と近い値になった。

3.4 偶数階開口・奇数階開口を並列させたモデル

実際の建築物においては，桁行方向に偶数階開口・奇数階開口耐震壁が交互に用いられる。そこで偶数階，奇数階に交互に開口を設けた場合のFEM解析による検討を行った(以下，並列耐震壁)。

2つの開口付耐震壁を同一平面でモデル化し，それぞれの各層梁芯位置を水平方向軸応力のみ負担出来る並進ばね要素により接続する。並進ばねの剛性は他の部材の水平剛性に比べ十分大きいものとする。各々の耐震壁頂部柱芯位置に軸力を作用させた後，外力を逆三角形分布とし，各層の梁芯位置に分布荷重で両壁均等に与え，一方向荷重増分解析を行った。

並列耐震壁，単独で用いた耐震壁それぞれのFEM解析で得られた1層層せん断力と全体変形角の関係を比較したものを図-7に示す。ここで，並列耐震壁の水平変位は，最上階梁芯位置に設けた並進ばね上の節点の水平変位とする。並列耐震壁の強度は，偶数階開口・奇数階開口を単独で用いた場合の強度を足し合わせた値よりも大きくなった。単独で用いた場合は有開口層で破壊が決まっていたが，並列させて用いた場合，各層で，剛性の高い無開口壁側にせん断力が集中することが要因として考えられる。並列耐震壁と単独で用いた耐震壁それぞれの破壊性状及び内部応力状態を比較する。最大耐力時の各層層間変形角分布を図-8に，最大耐力時の主応力分布図を図-9にそれぞれ比較して示す。水平変位測定位置は各壁ともに各層梁中央位置とする。偶数階開口は，2層で破壊

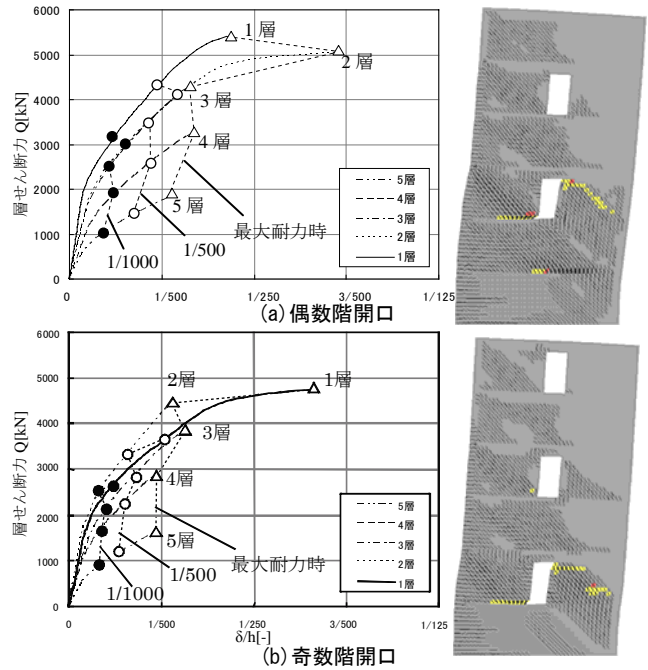


図-5 層せん断力層間変形角関係 図-6 ひび割れ損傷図

表-2 開口低減率の比較

試験体	γ_1	γ_2	γ_3	γ_{FEM}
偶数階開口	0.866	0.663	0.784	0.771
奇数階開口	0.866	0.663	0.741	0.735

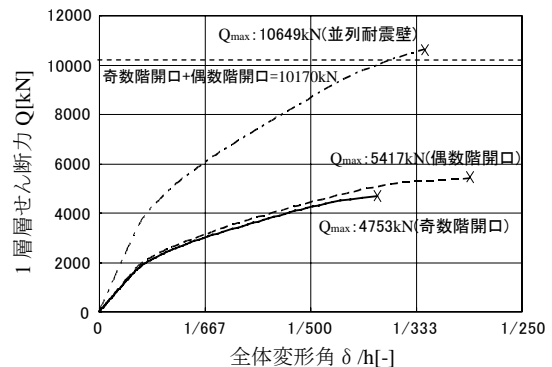
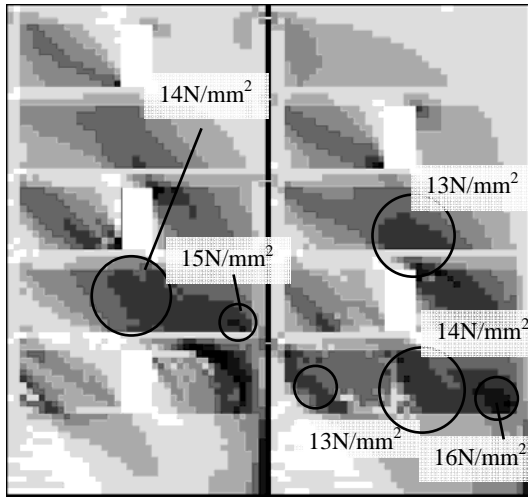


図-7 1層層せん断力と全体変形角の関係

していたが，並列耐震壁では，偶数階開口でも1層の変形が大きくなった(図-8)。奇数階開口では有開口層の間の2層で圧縮応力の負担が増え，偶数階開口でも開口の無い1層の壁の圧縮応力の負担が顕著になった(図-9)。図-10に無開口耐震壁と，並列耐震壁における奇数階開口・偶数階開口それぞれ(奇数階開口(並列)・偶数階開口(並列))の各層層せん断力-各層層間変形角関係の比較を示す。並列耐震壁では，単独で用いた場合，変形が集中していた1,2層で有開口壁のせん断力負担が小さくなり，無開口壁のせん断力負担が大きくなった(奇数階開口では2層，偶数階開口では1層)。偶数階開口の1層層せん断力は無開口耐震壁の1層層せん断力に近い値となった。並列耐震壁では，無開口壁の剛性が有開口壁の剛性よりも大きくなるため，有開口壁の負担が小さくなる傾



(a) 並列耐震壁

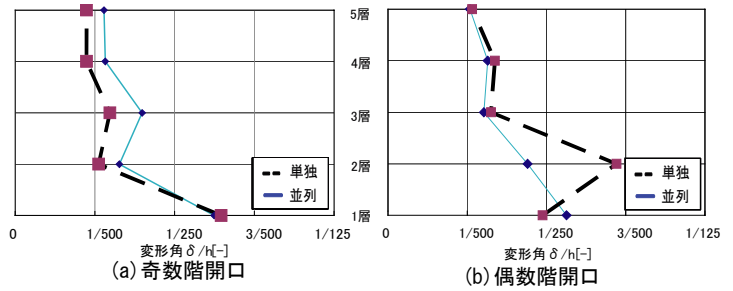


図-8 各層層間変形角分布

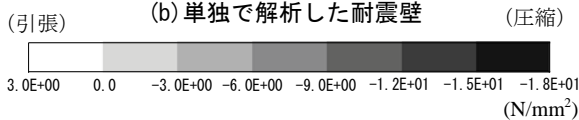
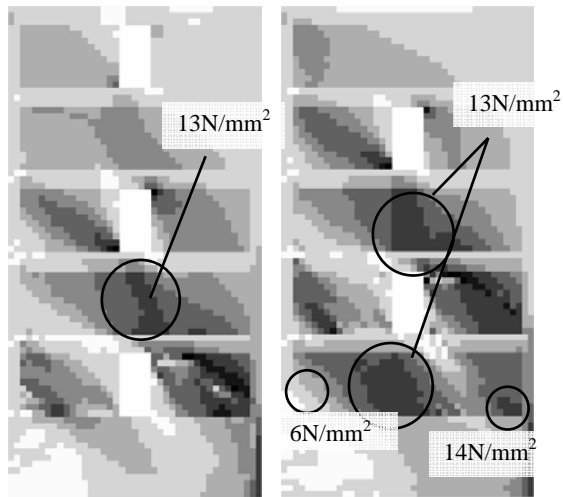


図-9 主応力分布図

向にあった。

無開口，奇数階開口それぞれを単独で解析した場合のせん断強度を足し合わせた値は，並列耐震壁全体の強度よりも大きくなり，並列耐震壁では終局時，奇数階開口の1層はせん断耐力に達しなかった。並列耐震壁では，無開口壁で破壊が生じるため，奇数階開口では1層，偶数階開口では2層で有開口壁のせん断強度に達しない。

4. エレメント置換モデルによる検討

4.1 解析モデルの概要

解析には，市販のフレーム弾塑性解析ソフト「SNAP⁹⁾」を使用した。エレメント置換ばねによるモデル化の図を図-11(a)に示す。エレメント置換モデルによる解析では，FEM解析と等しい軸力を節点荷重として最上階節点位置に作用させた後，地震荷重を逆三角形分布として各層の梁芯位置に分布荷重で与え，一方向荷重増分解析を行

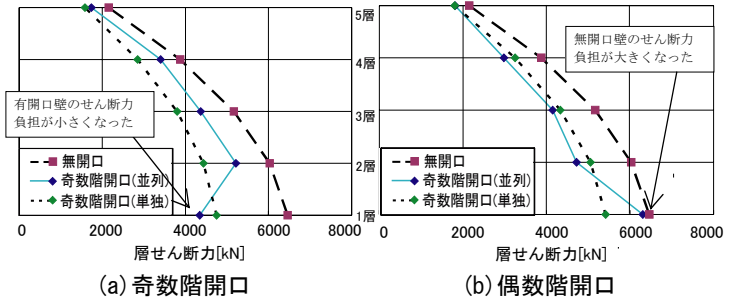
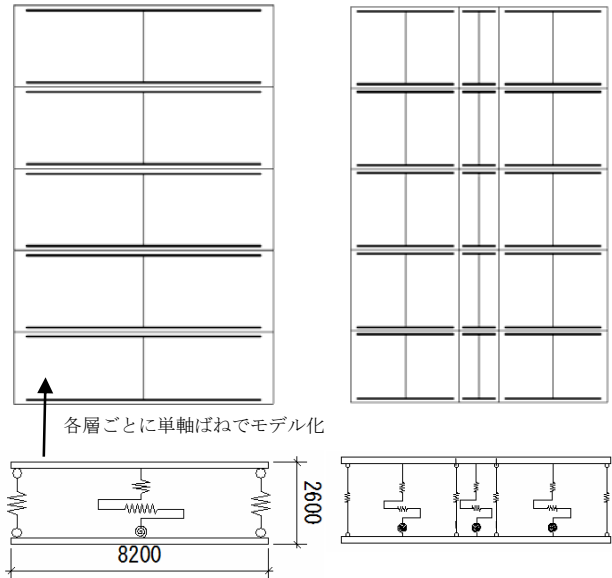


図-10 無開口と並列耐震壁の層せん断力分布の比較



(a) 1つのエレメント置換モデル (b) 3つのエレメント置換モデル

図-11 フレーム解析におけるモデル化図

った。また，最下階底面における節点の水平・鉛直方向の自由度を拘束した。耐震壁の枠梁は剛であるため回転方向の自由度も拘束される。今回の解析では，FEM解析で得られた変位と等しくなるまで解析を行った(奇数階開口は1層，偶数階開口では2層の変位に合わせる)。

開口付耐震壁は，無開口耐震壁で得られたせん断耐力にFEM解析結果から得られた開口低減率 γ_{FEM} を乗じること，無開口耐震壁のせん断剛性に，式(5)で表されるせん断剛性低減率を乗じて低減することでモデル化を行う。

$$\gamma = 1 - 1.25 \times 1.1 \times \sqrt{\frac{h_{op} l_{op}}{hl}} \quad (5)$$

また、開口部の断面積分の壁を考慮した3つのエレメント置換モデルでも検討を行う(図-11(b))。その場合、中央のエレメントの側柱は $b \times D = 150 \times 200 \text{mm}$ として扱う。有開口層の中央のエレメントは考えず、(5)式で定まるせん断剛性低減率を乗じる必要はないものとする。

FEM 解析同様、偶数階開口・奇数階開口を並列させた場合の検討も行う。

図-12 に各部材ごとの単軸ばねの復元力特性を示す(各記号・剛性の算出法については文献 10)を参照)。梁の仮定断面は、スラブを考慮した梁とする。梁のせん断ばねは、弾性と仮定した。壁板のせん断ばね、軸ばね、及び柱の軸ばねの復元力特性は原点指向型モデル、梁の曲げばね及び壁板脚部の曲げばねには Takeda モデルを使用した。また、3つのエレメント置換モデルについては、壁板のせん断ばねの強度を定義したエレメントごとの断面積の比でそれぞれ算出する。壁板の曲げばね、軸ばね、及び中央のエレメントの側柱は該当する部位の壁縦筋、コンクリート断面から再計算した値を用いる。

4.2 解析結果

4.2.1 1つのエレメント置換モデルによる検討

各層層せん断力—各層層間変形角関係を FEM 解析による結果と比較して図-13 に示す。図-13 で、FEM 解析の結果に比べ、エレメント置換モデルによる解析結果は、偶数階開口、奇数階開口ともに終局時の耐力は概ね評価することが出来たが、2層、3層で変形が大きくなった。その原因としては、FEM 解析では多数の要素で解析し、ステップごとに剛性を算出するのにに対し、エレメント置換モデルによる解析では3折点でのみ復元力特性が定義されるため、第2剛性が低く評価される。

4.2.2 3つのエレメント置換モデルによる検討

各層層せん断力—各層層間変形角関係を1つのエレメント置換モデルによる解析結果と比較して図-14 に示す。3つのエレメント置換モデルでは、いずれの解析モデルともに、1つのエレメント置換モデルによる解析結果に比べ、最終的な強度、変形は概ね等しい値となったが、途中の剛性を低く評価することとなった。3つのエレメント置換モデルではエレメントごとの壁せいを分けて考えているため、壁板部分の曲げ剛性の値が1つのエレメント置換モデルによる値に比べて小さくなる。中央の側柱でも、柱の軸降伏は起こっていないので、3つのエレメントで見た場合、壁板の持てる曲げ剛性が小さく評価され、途中の剛性が低く評価される。

4.2.3 偶数階開口・奇数階開口を並列させたモデル

図-15 に並列耐震壁の奇数階開口・偶数階開口の最大耐力時の層間変形角分布を FEM 解析で得られた並列耐震壁の解析結果と比較して示す。また、最大耐力時の両解析モデルにおける層せん断力分布の比較を図-16 に示

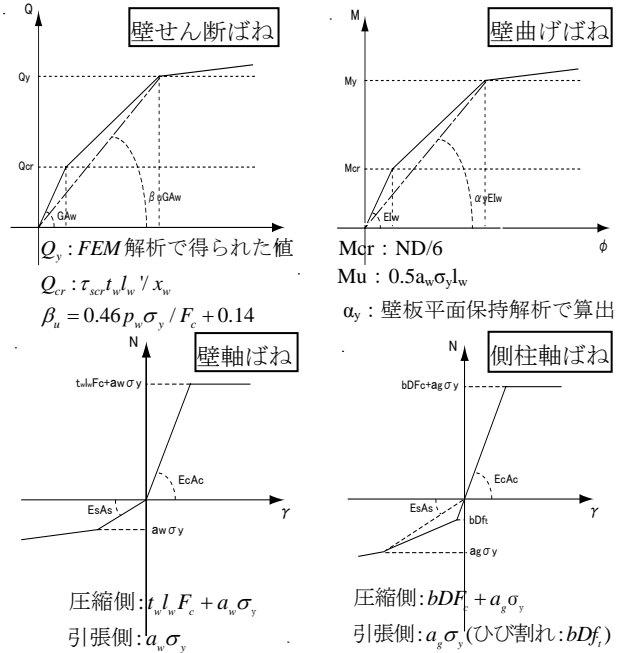


図-12 各部材の復元力特性

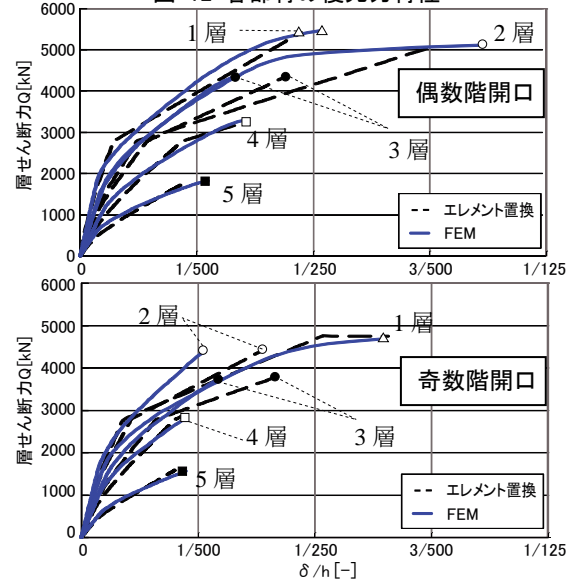


図-13 各層層せん断力—各層層間変形角関係の比較

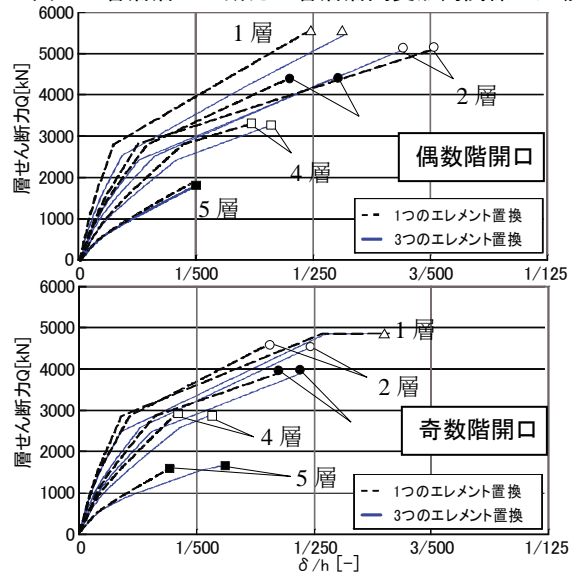


図-14 エレメント置換モデルの比較

す。並列耐震壁は1つのエレメント置換モデルでの検討とする。両解析モデルともに1層でせん断耐力に達した。奇数階開口では、5層は強度、層間変形角ともに良い対応を示しているが、FEM解析結果と比べ、2層で変形、強度、3層、4層で変形が大きくなった。偶数階開口では、4層、5層では良い対応を示しているが、2層で変形、3層で変形、強度ともに大きくなった。エレメント置換モデルで壁板のせん断第2剛性が低く評価されたことによる。

エレメント置換によるモデル化で、無開口、奇数階開口それぞれのせん断強度を足し合わせた値は、並列させた耐震壁全体の耐力と概ね等しい値となった。

FEM解析では、無開口、奇数階開口のせん断耐力を足し合わせた値は過大評価となっていた。開口付耐震壁を並列させて用いた場合、エレメント置換によるモデル化では奇数階開口1層にかかるせん断力を適切に評価することが出来ていない。両壁のせん断耐力の足し合わせの評価には、有開口壁の剛性の適切な評価が必要である。

有開口壁の剛性を正確に評価出来ていなければ全体耐力を小さく評価する。有開口壁の剛性、耐力ともに大きく評価した場合、建物全体の強度を過大評価する可能性がある。エレメント置換モデルによる耐震設計において、開口付耐震壁の剛性、耐力を高く評価しすぎないよう注意が必要である。

5. まとめ

本研究で得た知見を以下に要約する。

- (1) 開口低減率は、等価開口周比に基づく γ_2 が最小となり、安全側の評価となる。
- (2) 単独で用いた場合、エレメント置換モデルは、有開口層のせん断ばねの復元力特性に開口低減率、せん断剛性に剛性低減係数をそれぞれ乗じることで、概ね耐力を評価できたが、ひび割れ後の第2剛性を低く評価してしまうことで、偶数階に開口を有する耐震壁では3層の、奇数階に開口を有する耐震壁では2、3層の層間変位が大きくなる。
- (3) 並列させた場合、FEM解析モデルとエレメント置換モデルの比較では、エレメント置換モデルの方の層間変位が大きくなるが耐力はほぼ一致する。壁板のせん断第2剛性評価が問題となる。

なお、これらの知見は5層以上の場合にも適用できると考えられる。

謝辞

本研究は、UR都市機構の2戸1改造併用耐震改修委員会の一環として行った。研究においては、関係者より貴重な意見を頂いた。ここに謝意を表す。

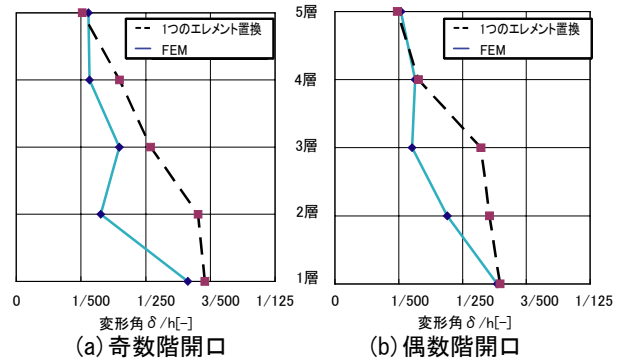


図-15 最大耐力時の層間変形角分布の比較

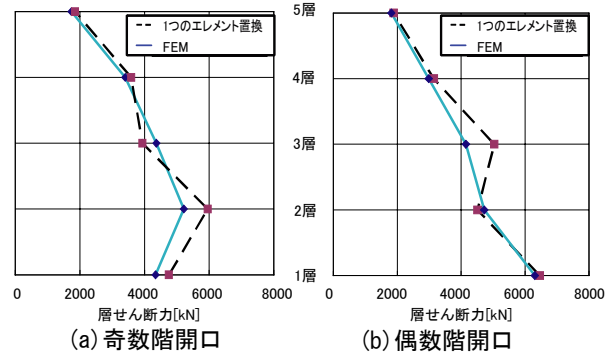


図-16 最大耐力時の層せん断力分布の比較

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、2010
- 2) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL/V11
- 3) 長沼一洋, 栗本修, 江戸宏彰：鉄筋コンクリート壁体のFEMによる正負繰返し及び動的解析, 日本建築学会構造系論文集, 第544号, pp.125-132, 2001.6
- 4) 長沼一洋：三軸圧縮のコンクリート応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.167-170, 1995.8
- 5) Kupfer, H.B and Gerstle, K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, 1973.8
- 6) 長沼一洋, 山口恒雄：面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.649-650, 1990
- 7) 長沼一洋：鉄筋コンクリートの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報告集, 第421号, pp.39-48, 1991.3
- 8) 財団法人日本建築センター：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書
- 9) 構造システム(株)：SNAP/V4
- 10) 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, 1999