

論文 曲げ降伏型複数開口 RC 造耐震壁の FEM によるパラメトリック解析

櫻井 真人^{*1}・田中 昭^{*2}・倉本 洋^{*3}・松井 智哉^{*4}

要旨: 本研究では、曲げ降伏型有開口耐震壁の開口数および位置が耐震壁の変形性能に及ぼす影響を検討することを目的としている。本論文では、筆者らが提案した有限要素法解析による有開口耐震壁のモデル化手法を曲げ降伏型耐震壁にも適用できるように修正し、開口が側柱脚部に隣接した複数開口耐震壁を対象に開口位置および個数を変数としたパラメトリック解析を行った。その結果、開口が側柱脚部に隣接した耐震壁では他方の開口位置および個数の違いが圧縮ストラットに影響を及ぼすため、開口が隣接する側柱脚部に圧縮応力が集中し当該部位がせん断破壊に至る場合があることを示した。

キーワード: 有開口耐震壁, 複数開口, FEM 解析, 曲げ降伏型, 対角開口, 圧縮ストラット

1. はじめに

筆者らは開口を有する鉄筋コンクリート (RC) 造耐震壁 (以下, 有開口耐震壁) の定量的な性能評価手法の確立を念頭において, 開口の個数および位置が構造性能に及ぼす影響を把握することを目的とした構造実験を継続的に実施してきた^{1),2)}。2009 年度には, 図-1 に示すような 2 つの開口が対角に配置されたせん断破壊型の有開口耐震壁の構造実験 (以下, 2009 年度実験)³⁾ を行い, 開口位置が及ぼす影響について検討した。また 2011 年には 2009 年度実験の試験体と同形状で破壊形式が曲げ降伏型となる有開口耐震壁の構造実験 (以下, 2011 年度実験)⁴⁾ を行い, 曲げ降伏型耐震壁における構造性能について検討した。その結果, 2 つの開口が中央部に配置された耐震壁 (試験体 WO8, WO8-F2) では破壊形式の違いによらず, ほぼ同様の破壊経過を示した。これに対して, 開口が側柱脚部に隣接する耐震壁においては, せん断破壊型耐震壁 (試験体 WO7) では壁板での圧壊により急激に耐力が低下する結果となったのに対し, 曲げ降伏型耐震壁 (試験体 WO7-F2) では開口が隣接する側柱脚部のせん断破壊が早期に発生し, 曲げ降伏型として設計した耐震壁にも関わらず変形性能の向上がほとん

どみられない結果となった。

このように開口が側柱脚部に隣接する曲げ降伏型耐震壁では他の有開口耐震壁と比べて変形性能が乏しくなる可能性があるとともに, 開口配置の組み合わせによってはさらに他の挙動を示すことも予想される。

以上の背景から, 本研究では曲げ降伏型複数開口耐震壁の開口数および位置が耐震壁の変形性能に及ぼす影響を検討することを目的としている。本論文ではまず, 筆者らが提案したせん断破壊型有開口耐震壁の有限要素法 (以下, FEM) 解析によるモデル化手法⁵⁾ について, 曲げ降伏型耐震壁にも適用できるように修正し, 2009 年度実験および 2011 年度実験結果とのシミュレーションから当該モデルの適用性について検討した。また, 開口が側柱脚部に隣接した耐震壁を対象に開口位置および個数を変数としたパラメトリック解析を行い, 開口位置および個数の違いが曲げ降伏型有開口耐震壁の変形性能に及ぼす影響について検討した。

2. 解析対象試験体の概要

図-1 に解析対象試験体の形状および寸法を示し, 表-1 に試験体の部材断面詳細を示す。解析対象試験体は無開口耐震壁 2 体を含む計 6 体であり, 6 層程度の RC

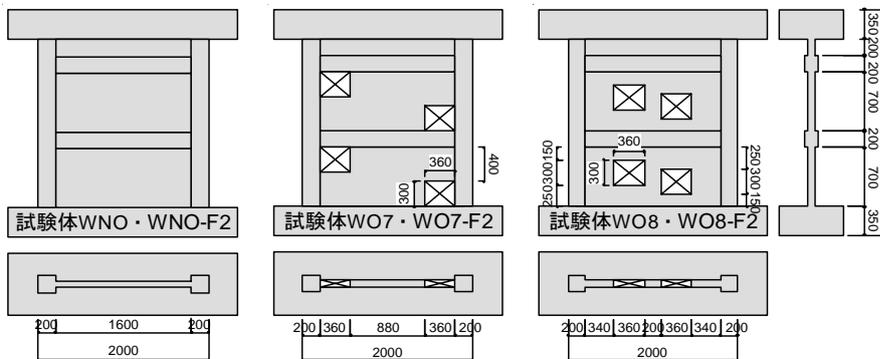


図-1 試験体形状

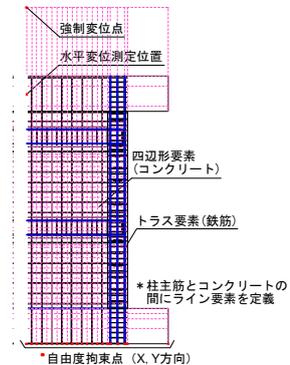


図-2 要素分割図

*1 (独) 日本学術振興会特別研究員 PD 博士(工学)(正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 大学院生(正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学)(正会員)

*4 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学系 准教授 博士(工学)(正会員)

表-1 試験体断面詳細

柱	B×D	200×200(mm)
	主筋	8-D13($p_g=2.5\%$):2011 年度実験 12-D13($p_g=3.8\%$):2009 年度実験
	帯筋	2-D6@60($p_w=0.53\%$)
	副帯筋	D6@60($p_w=0.27\%$)
梁	B×D	150×200(mm)
	主筋	4-D10($p_t=0.54\%$)
	帯筋	2-D6@100($p_w=0.42\%$)
壁	壁厚	80(mm)
	縦筋	D6@100 千鳥($p_s=0.4\%$)
	横筋	D6@100 千鳥($p_s=0.4\%$)
	開口補強筋	D10 (縦・横)

表-2 コンクリートの材料特性

2011 年度実験		WNO-F2	WO7-F2	WO8-F2
σ_B (N/mm ²)	1層	27.7	27.2	29.6
	2層	25.6	26.5	28.4
2009 年度実験		WNO	WO7	WO8
σ_B (N/mm ²)	1層	30.1	31.6	30.3
	2層	31.0	33.1	29.8

表-3 鉄筋の材料特性

鉄筋		降伏点	ヤング係数	引張強度
種別	使用部位	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
2011 年度実験				
D6	壁筋・柱梁補強筋	338	160	384
D10	梁主筋・開口補強筋	347	185	408
D13	柱主筋	343	199	483
2009 年度実験				
D6	壁筋・柱梁補強筋	306	148	451
D10	梁主筋・開口補強筋	344	202	472
D13	柱主筋	456	196	585

造建築物における連層耐震壁の下部2層を想定した実在の約1/3縮尺モデルである。各試験体とも等価開口周比は約0.4とし、各層に2つの開口を配置した。

試験体 WNO, WO7 および WO8 はそれぞれ 2009 年度実験³⁾の試験体であり、せん断破壊型耐震壁である。一方、試験体 WNO-F2, WO7-F2 および WO8-F2 はそれぞれ 2011 年度実験⁴⁾の試験体であり、曲げ降伏型耐震壁である。

実験変数は開口位置および個数である。試験体 WNO シリーズは無開口試験体であり、試験体 WO7 シリーズおよび WO8 シリーズは同一形状の開口を対角配置させた有開口耐震壁である。試験体 WO7 シリーズはそれぞれの開口を側柱に隣接させたのに対して、試験体 WO8 シリーズはそれぞれの開口を壁板中央部に配置した。

表-2 にコンクリートの材料特性を、表-3 に鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。鉄筋は、2009 年度実験では側柱主筋に D13 (SD390) 鉄筋を 12 本用いたのに対し、2011 年度実験では D13 (SD295A) 鉄筋を 8 本用いた。

実験では、一定軸力(柱軸力比 $N/bD\sigma_B=0.2$ に相当)を試験体頂部に作用させると同時に、载荷中は所定のせん断スパン比(2009 年度実験:1.2, 2011 年度実験:1.8)となるよう、作用せん断力に対応させて当該鉛直ジャッ

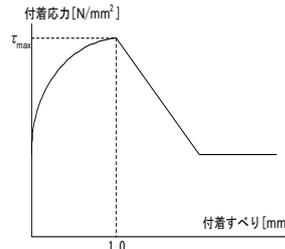


図-3 鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係

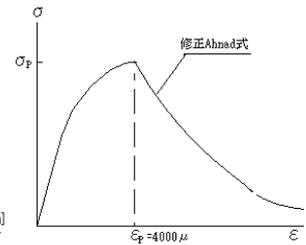
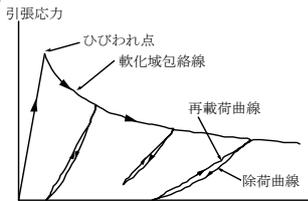
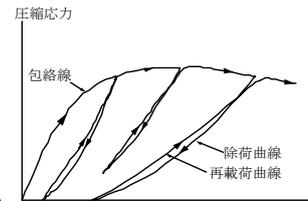


図-4 コンクリートの応力ひずみ関係

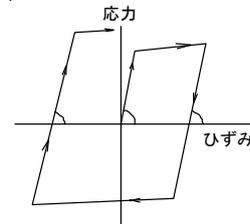


a) 引張側の履歴特性



b) 圧縮側の履歴特性

図-5 コンクリートの履歴モデル



直線モデル(等方硬化則)

図-6 鉄筋の履歴特性

キを制御することで試験体頂部に付加モーメントを作用させた。

3. FEM 解析の概要

筆者らは文献5)において、せん断破壊型有開口耐震壁の FEM 解析によるモデル化手法を提案している。曲げ降伏型有開口耐震壁のモデル化についても文献5)のモデル化手法に基づくものとし、壁板および柱と下スタブの境界に離散ひび割れ要素を新たに定義することで耐震壁脚部の曲げ変形を再現することとした。

解析は2次元解析とし、平面応力場を仮定した。図-2 に試験体 WNO-F2 を例としたコンクリートの要素分割図を示す。コンクリートは4節点四辺形要素を定義し、壁筋、帯筋および副帯筋は埋め込み鉄筋としてコンクリート要素内に層状置換した。柱および梁主筋はトラス要素にて線材として置換した。なお、主筋についてはコンクリートからの抜け出しを考慮するため、コンクリート要素とトラス要素の節点をそれぞれ別に定義し、接合要素を挿入することで鉄筋の抜け出しをモデル化した。また、曲げ変形による壁脚部の浮き上がりを表現するため、壁板と下部スタブとの境界に接合要素を挿入することで離散ひび割れをモデル化した。なお、鉄筋とコンクリ

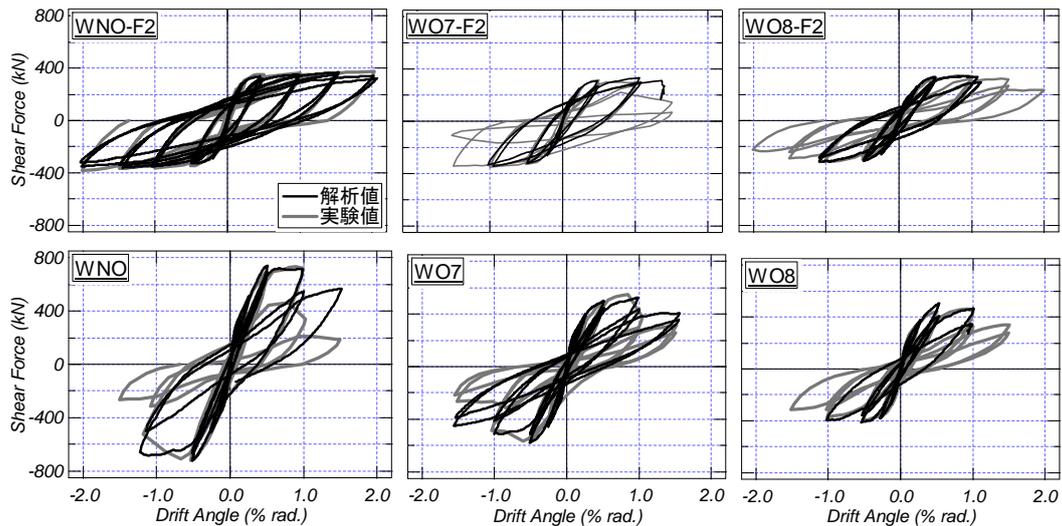


図-7 荷重-変形角関係における実験結果と解析結果の比較
(上図：曲げ降伏型 下図：せん断破壊型)

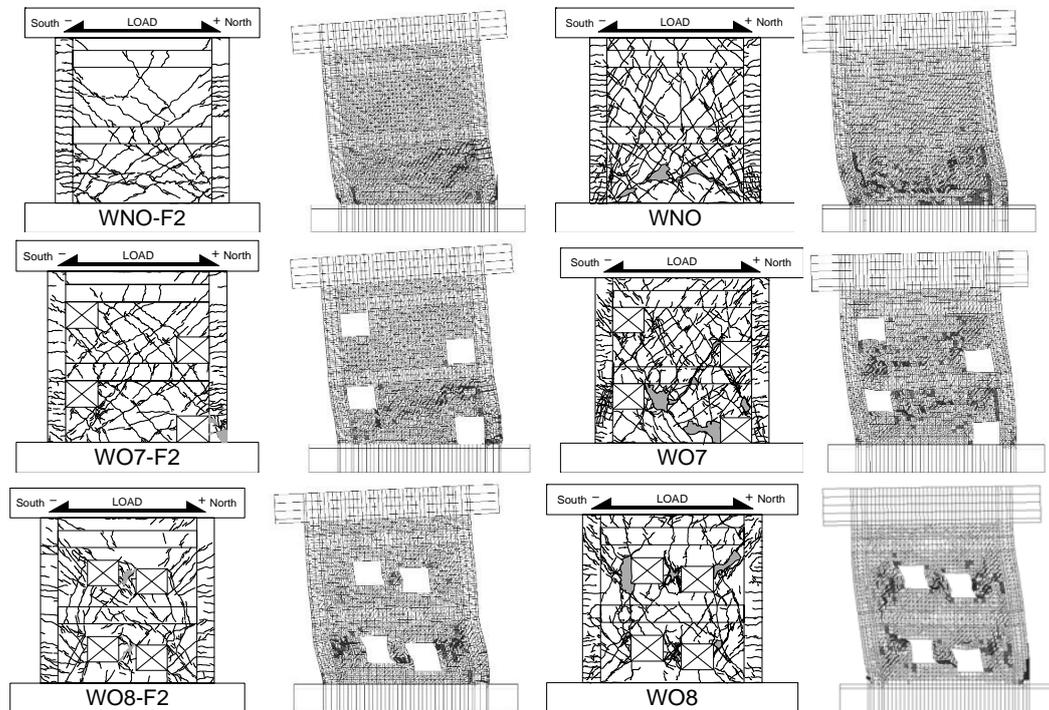


図-8 破壊性状における実験結果と解析結果の比較 (R=1/100rad. 負荷荷終了時)

ートの付着応力度-すべり関係は図-3に示す Elmorsi らの提案モデルを修正することによりモデル化した⁶⁾。本解析では、実験と同様のせん断スパン比とするため、上スタブの上端から想定加力高さまで仮想スタブを剛強な弾性体としてモデル化し、その上端に強制変位を与えた。また、軸力は仮想スタブ上端において一定軸力を与え、下スタブ下端のコンクリートおよび鉄筋要素の節点では水平、鉛直および面外方向の自由度を拘束した。解析では実験時と同様の荷重を行い、不釣合い力の収束計算が不安定化した時点で終了した。なお、解析には非線形コンクリート構造解析ソフト「FINAL⁷⁾」を使用した。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現した。コンクリートの応力ひずみ特性は図-4に示す修正 Ahmad モデル⁸⁾を使用し、ひび割れ

発生後は圧縮特性の劣化を考慮し最大強度とその時のひずみを低減した。ひび割れ発生後の tension stiffening 特性は長沼・山口モデル⁹⁾を、せん断伝達特性は長沼の提案モデルを使用した。図-5にコンクリートの繰り返し応力下における履歴モデルを示す。除荷・再載荷曲線は、引張側、圧縮側共に、2次曲線で表現した¹⁰⁾。ひび割れ後のせん断伝達特性は、ひび割れ方向のせん断応力-せん断ひずみ関係で表現し、包絡線はコンクリートの一軸圧縮強度、鉄筋量、ひび割れ直交ひずみおよびひび割れ方向のせん断ひずみの関数で与えられるものとした。鉄筋の履歴特性は図-6に示す等方硬化則に基づく bilinear モデルを使用した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性は表-2および表-3の値を用いた。また、実験時における試験体の乾燥収縮の影響や初期ひび割れに

よる剛性の低下を考慮するために、コンクリートの引張強度、ヤング係数および圧縮強度時のひずみは文献 11) の計算式により算定し、解析では壁板部分のコンクリートの引張強度を算定値の 0.5 倍、ヤング係数を算定値の 0.5 倍、圧縮強度時のひずみを 2 倍に修正したものを用いた^{5),11)}。

4. 解析結果と実験結果の比較

4.1 荷重-変形角関係

図-7 に解析と 2009 年度実験および 2011 年度実験における荷重-変形角関係の比較を示す。

曲げ降伏型試験体において、無開口試験体 WNO-F2 では最大耐力を記録した $R=1/50\text{rad}$ のサイクルよりも早い段階でわずかに耐力が低下しているものの、およそ最大耐力付近まで解析結果と実験結果で良い対応を示している。有開口試験体 WO7-F2 および WO8-F2 においては試験体 WNO-F2 と比べて早期に不釣合い力の収束計算が不安定となるため $R=1/100\text{rad}$ 程度までしか実験結果を再現できていないものの、実験結果と解析結果で良い対応を示している。また、せん断破壊型試験体に対する解析結果においても、最大耐力後の耐力低下の挙動は模擬できていないものの、剛性および最大耐力の解析値は実験値と比べて概ね一致していることがわかる。

4.2 破壊性状

図-8 に $R=1/100\text{rad}$ 負荷荷終了時における各試験体の解析結果によるひび割れ図および実験時のひび割れ損傷状況を示す。なお、2011 年度実験および 2009 年度実験では載荷方向が南側から北側（図中の左側から右側）が正載荷となる。

曲げ降伏型耐震壁である無開口試験体 WNO-F2 の解析時における損傷状況では、引張側柱 1 層中央部分から柱頭部分にかけて曲げひび割れの拡幅が顕著にみられた。実験結果においても、引張側柱では 1 層柱脚よりも中央部分のひび割れ幅の拡幅が顕著であることが確認されている。一方、有開口試験体 WO7-F2 では実験時に破壊が早期に進行した北側柱脚部において同様な傾向を示す解析結果が得られている。また、試験体 WO8-F2 では解析結果において 1 層壁板の破壊が進行しているものの、実験時と同様に 2 層開口間壁板においてもコンクリートの軟化が進行している結果となった。

せん断破壊型試験体の解析においても、試験体 WNO の 1 層中央壁板でスリップ破壊を生じる様子、試験体 WO7 の 1 層中央壁板および 2 層北側開口から 1 層南側開口に向けての損傷状況、試験体 WO8 の 2 層開口間壁板の損傷状況など、実験結果と同様の傾向が認められる。このことより、解析結果は各試験体の損傷状況を捉えているといえる。

5. 曲げ降伏型複数開口耐震壁のパラメトリック解析

5.1 解析モデルの概要

開口が側柱脚部に隣接した試験体 WO7 シリーズの実験結果は、曲げ降伏型のものではせん断破壊型のものとは比べて変形性能が向上しない結果となったことが確認されている^{3),4)}。そこで当該耐震壁における開口配置の影響を詳細に検討するために、本章では開口位置を変数としたパラメトリック解析を実施した。

図-11 (a) に試験体 WO7-F2 および新たに設定した解析モデル 2 体の形状を示す。解析モデルは試験体 WO7-F2 を基準として、解析モデル WO7-N1 は試験体 WO7-F2 から南側の開口を除いたものとし、解析モデル WO7-N2 はそれぞれの開口を各層側柱脚部に隣接させたものとした。また、解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料構成則は試験体 WO7-F2 のものと同様とした。

5.2 破壊進行状況

図-11 (b) に試験体 WO7-F2 の実験結果および解析結果、また解析モデル WO7-N1 および WO7-N2 の荷重-変形角関係を示し、また、図-11 (c) に $R=1/67\text{rad}$ 正載荷終了時における破壊性状を示す。なお、載荷方向は 2011 年度実験と同様に南側から北側（図中の左側から右側）を正載荷とした。

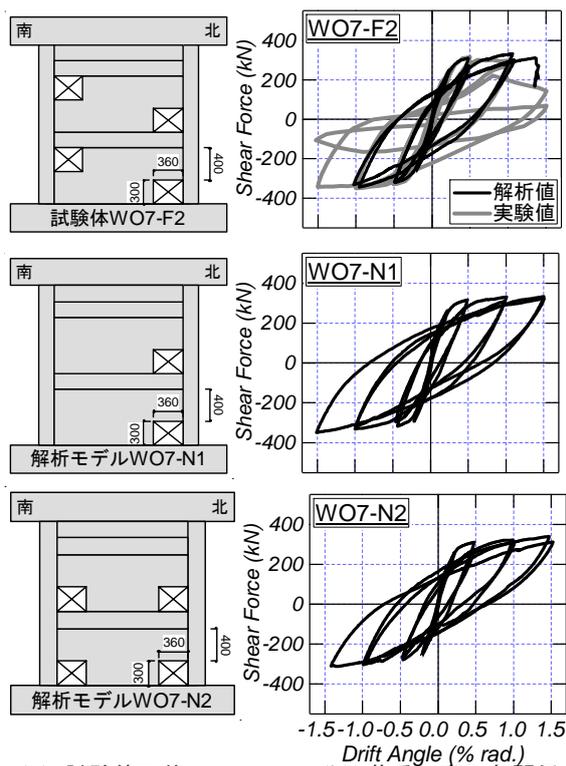
荷重-変形角関係をみると、試験体 WO7-F2 では最大耐力を記録した $R=1/100\text{rad}$ のサイクルにおいて北側柱脚部においてせん断破壊が生じ、 $R=1/67\text{rad}$ の正載荷第 1 サイクルにおいて当該部分の破壊が進行したため、収束計算が不安定となり解析を終了した。一方、解析モデル WO7-N1 および WO7-N2 では、 $R=1/100\text{rad}$ のサイクル以降においても耐力の低下がみられず、 $R=1/67\text{rad}$ までは耐力を保持する結果となり、北側柱脚部に開口が配置されているのにも関わらず試験体 WO7-F2 と比べて変形性能が高くなる結果が得られた。

破壊性状をみると、試験体 WO7-F2 では $R=1/67\text{rad}$ において実験結果と同様に北側柱脚部におけるせん断破壊によって、当該部分のコンクリートの圧壊が顕著であることが確認できる。また、解析モデル WO7-N2 においても試験体 WO7-F2 と同様の傾向が認められた。

さらに、いずれの試験体および解析ケースにおいても北側柱と壁板の境界に沿ってコンクリートの圧壊が認められ、当該部分に変形が集中する傾向がみられた。また、解析モデル WO7-N1 では 1 層南側柱頭から南側開口部にかけて壁板の損傷が顕著となり、WO7-N2 では 1 層壁板中央脚部においても損傷が顕著にみられた。

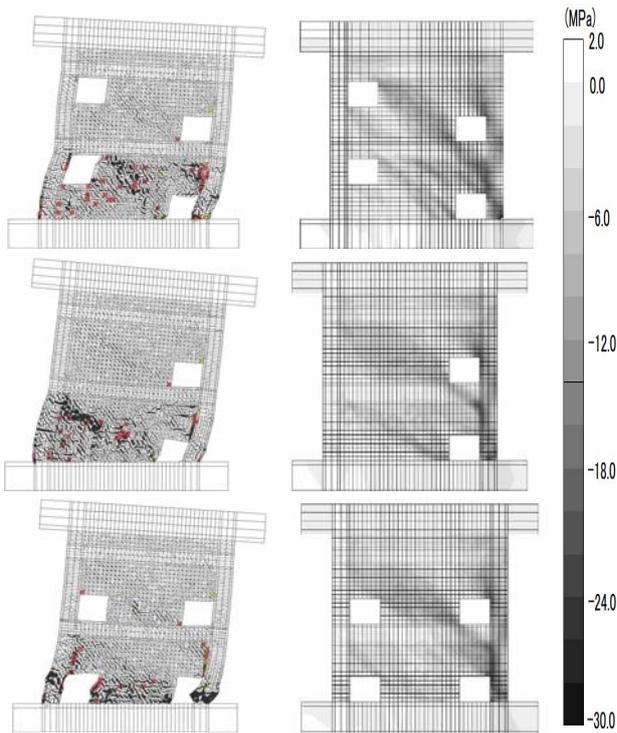
5.3 最小主応力分布

図-11 (d) に試験体 WO7-F2 および解析モデル WO7-N1, WO7-N2 の $R=1/100\text{rad}$ 正載荷終了時における最小主応力分布図（圧縮応力分布図）を示す。



(a) 試験体形状

(b) 荷重-変形角関係



(c) 破壊性状

(d) 最小主応力分布図

図-1.1 パラメトリック解析結果

全試験体および解析モデルにおいて2層南側壁板から1層北側柱脚部にかけて斜め方向の圧縮ストラットが形成されており、圧縮側柱脚部において高い圧縮応力が生じている。中でも試験体 WO7-F2 の圧縮ストラットは2層南側開口の影響によって他の解析モデルよりも圧縮応力が高く、幅の狭いものが形成されていることがわかる。1層壁板の圧縮ストラットをみると、解析モデル WO7-N1 および WO7-N2 では、主に1層南側柱柱頭から北側開口付近へむけて1層壁板全体で幅の広い圧縮ストラットが形成されているのに対し、試験体 WO7-F2 の圧縮ストラットは2層のものと同様に、1層南側開口の影響により応力が高く、幅の狭いものが形成されている。また、圧縮南側開口下部には圧縮ストラットが形成されず、開口間壁板のみがせん断力負担に寄与しているものとみられる。

5.4 負担せん断力

図-1.2 に試験体 WO7-F2 および解析モデル WO7-N1, WO7-N2 の1層各部位における負担せん断力を示す。各部位のせん断力は図中で示した高さ位置におけるコンクリートの各要素に生じるせん断力の和としている。なお、解析モデル WO7-F2 は $R=1/70rad$ 以降、収束計算の不安定化により解析を終了したため、当該変形角での負担せん断力を示している。

試験体 WO7-F2 では $R=1/100rad$ で圧縮側となる北側柱で全せん断力のうち 58% のせん断力を負担している。その後 $R=1/67rad$ では北側柱脚部のせん断破壊に伴い、当

該柱の負担せん断力が減少し、引張側柱および中央壁板の負担分が増加するものの全せん断力は低下する結果となった。

解析モデル WO7-N1 では $R=1/100rad$ で圧縮側となる北側柱で全せん断力のうち 45% のせん断力を負担している。その後の载荷サイクルの進行に伴い、北側柱のせん断力負担分が減少するものの、代わりに中央壁板および引張側となる南側柱の負担せん断力が増加している傾向がみられた。

解析モデル WO7-N2 では $R=1/100rad$ で圧縮側となる北側柱で全せん断力のうち 52% のせん断力を負担しており、その後の载荷サイクルでは、南側柱の負担せん断力の増加が顕著となった。また、両解析モデルとも全せん断力が低下する傾向はみられなかった。

5.3 節および 5.4 節の考察から推定される耐震壁内部のせん断抵抗機構について考察する。図-1.3 に耐震壁で形成されるせん断抵抗機構のモデル図を示す。同図によると、試験体 WO7-F2 では1層壁板における圧縮ストラットの幅が狭く、当該部位で負担できるせん断力は圧縮側柱よりも小さい結果となった。このため他の解析モデルと比べて圧縮側柱に応力が集中しやすい開口配置であったといえる。また、試験体 WO7-F2 では圧縮側柱脚部の損傷による当該柱のせん断力喪失分を他の部材が負担できずにそのまま脆性的破壊に至ったものと考えられる。一方、解析モデル WO7-N1 および WO7-N2 では中央壁板において試験体 WO7-F2 よりも幅の大きな

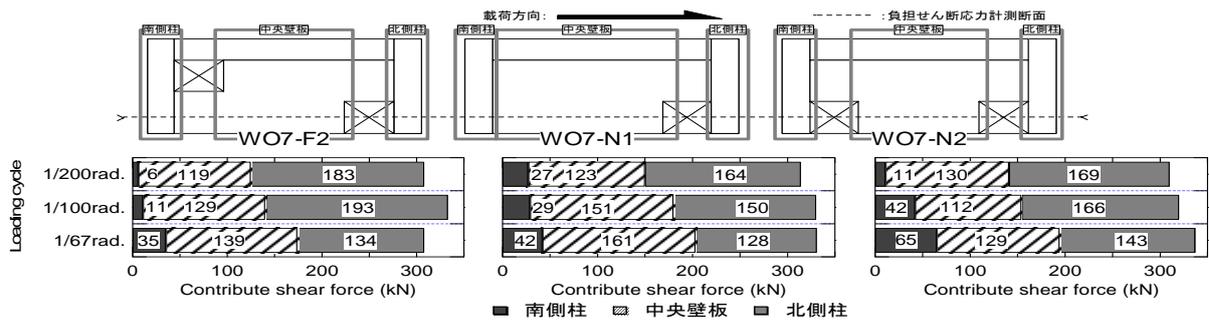


図-1 2 耐震壁内部の圧縮ストラットによるせん断抵抗機構モデル図

ストラットが形成されている。このため最大耐力到達まで中央壁板の負担せん断力は圧縮側柱のものと同等となり、 $R=1/67rad.$ で圧縮側柱の損傷により当該柱の耐力低下が生じて、中央壁板および引張側柱が圧縮側柱のせん断力喪失分を分担することで全せん断力を保持する挙動になったと推察される。

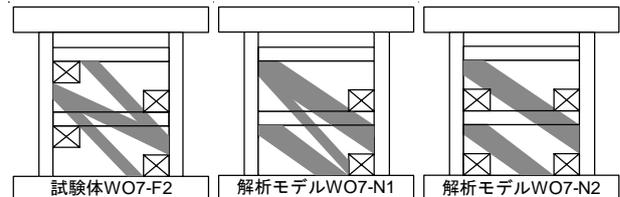


図-1 3 耐震壁内部の圧縮ストラットによるせん断抵抗機構モデル図

6. まとめ

本研究では、曲げ降伏型となる複数開口耐震壁の FEM 解析を実施し、曲げ降伏型耐震壁に対するモデル化手法の適合性を確認した。また、開口が側柱脚部に隣接した耐震壁を対象に、開口位置および個数を変数としたパラメトリック解析を行い、開口位置および個数の違いが曲げ降伏型有開口耐震壁の変形性能に及ぼす影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 既報で提案した有開口耐震壁の提案モデルに離散ひび割れ要素を追加することにより、曲げ降伏型有開口耐震壁の実験時の挙動を良好に再現できる。また、せん断破壊型の耐震壁についても同様に実験結果を再現可能である。
- (2) 試験体 WO7-F2 では、早期に圧縮側柱脚部に損傷が集中し、その後当該柱のせん断力喪失分を中央壁板および引張側柱が負担できずに脆性的破壊に至り、変形能が向上しない結果となった。
- (3) 解析モデル WO7-N1 および WO7-N2 では、 $R=1/67rad.$ で圧縮側柱の損傷により耐力低下が生じて、中央壁板および引張側柱が圧縮側柱のせん断力喪失分を分担することで全せん断力を保持する挙動となった。

参考文献

- 1) 鈴木健太, 秋田知芳, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造有開口耐震壁の静的載荷実験, コンクリート工学年次論文集, 第 29 巻, 第 3 号, pp.325-330, 2007.7
- 2) 櫻井真人, 松井智哉, 鈴木健太, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造耐震壁の耐震性能に及ぼす開口位置の影響, コンクリート工学年次論文集, 第 30 巻, 第 3 号, pp.421-426, 2008.7

- 3) 櫻井真人, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する RC 造耐震壁の耐震性能に及ぼす開口配置の影響, コンクリート工学年次論文集, 第 32 巻, 第 3 号, pp.415-420, 2010.7
- 4) 田中昭, 櫻井真人, 松井智哉, 倉本洋: 曲げ降伏が先行する複数開口 RC 造耐震壁の構造性能, コンクリート工学年次論文集, 第 34 巻, 第 2 号, pp.367-372, 2012.7
- 5) 櫻井真人, 松井智哉, 倉本洋: 複数開口を有する耐震壁の FEM 解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 639 号, pp.915-923, 2009.5
- 6) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H. : Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, 2004.8
- 7) 伊藤忠テクノソリューションズ (株) : FINAL/V11 HELP
- 8) 長沼一洋: 三軸圧縮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.
- 9) 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, 1990.10.
- 10) 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報告集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3.
- 11) 雨宮篤, 野口博: 超高強度鉄筋コンクリート部材の有限要素解析プログラムの開発(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C (構造 II), pp.639-640, 1990.10.
- 12) 井元勝慶, 米澤健次, 加藤朝郎, 川里健: /4PCCV の耐圧限界挙動に関するラウンドロビン解析, Concrete journal, Vol.41, No.1, pp.153-157, 2003.1