

論文 RC 方立壁の構造実験のシミュレーション解析とせん断補強筋量に着目したパラメータ解析

松尾 啓斗*1・尹 ロク現*2・真田 靖士*3

要旨: 筆者らの既往研究では 11 階建て SRC 造集合住宅の最下層部における RC 方立壁の構造性能を実験的に確認した。本稿では、方立壁のせん断補強筋の配筋量が構造性能に与える影響を把握するため数値解析を計画し、はじめに上記実験の試験体の挙動を再現することを試みた。解析結果は荷重-変形関係や破壊性状などを精度よく模擬した。さらに、せん断補強筋の配筋量を変数とするパラメトリック解析を行った結果、方立壁に作用する最大の圧縮軸力比は約 0.32 に達することを確認した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 非構造壁, せん断耐力, FEM 解析, 圧縮軸力

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震¹⁾や 2016 年熊本地震²⁾などの近年の国内地震では、既存不適格な鉄筋コンクリート造 (以下, RC) 建物を除外すると, RC 建物の構造部材の地震動による被害は総じて小さかった。一方, 近年の地震における RC 建物の典型的な被害として, 一般に非構造部材として扱われる方立壁の損傷が挙げられる。方立壁など非構造部材は構造性能に寄与しない部材として, 構造計算では考慮されない場合も多い。方立壁は地震時に生じる軸方向伸びを上下階の梁により拘束されるため, 高い軸力が作用することが予てより指摘されており^{例えば 3)}, 筆者らの既往の実験, 解析研究でも^{4) 5)}, 方立壁が小変形域では高い強度寄与を示し, 大変形域では建物下層の方立壁のせん断破壊が層剛性を軟化させるなどの構造性能への影響が明らかになっている。一方で, 特に小変形域において方立壁は柱梁架構が負担するせん断力のうち最大で 3 分の 1 を負担するなど高いせん断耐力を発揮することが明らかになっており⁴⁾, 方立壁の持つ構造性能を積極的に活用した設計法 (例えば強度型の建物) が期待される。上記の影響を評価するためには方立壁に作用する軸力を評価する必要があるが, 一般の構造設計においてこれを評価することは困難であり, 従って方立壁のせん断破壊の発生を予測することは困難である。

以上の背景を踏まえて, 筆者らは, 2018 年度に一般的な配筋の方立壁を対象とした静的載荷実験を行い, 方立壁に作用し得る軸力の評価を試みた⁶⁾。その結果, 方立壁が早期にせん断破壊したため, 導入軸力が軸力比 0.2 を超過した水準に留まった。方立壁を構造要素として利用することを想定すると, そのせん断破壊を抑制することが望ましいが, 同時に高い圧縮軸力の作用が懸念

されるため, せん断破壊の抑制に必要な配筋量を明らかにするためには導入軸力の推定が不可欠である。

そこで, 本研究では柱梁架構と一体的に建設された RC 方立壁単体の二次元 FEM 解析を行い RC 方立壁の構造性能を適切に評価できるモデル化手法を検討する。また, せん断補強筋量が方立壁の構造性能に与える影響を定量的に把握するためにその配筋量をパラメータとする解析を行った。

2. 解析対象の静的載荷実験概要

本章では後述する解析モデルの妥当性を検証するため, 文献 6) の W1 試験体の実験結果と比較する。以下では実験の概要について抜粋して示す。実験の詳細については同文献 6) を参照されたい。

2.1 試験体

本研究の試験体は Fig.1 に示す 11 階建て (高さ 30.9m) の SRC 造集合住宅の最下層部における柱梁架構のうち, 外構面の掃き出し窓間に設置された RC 方立壁を模擬する実大模型である。試験体配筋図を Fig.2 に示す。試験体形状は壁厚×幅が 150mm×1,050mm であり, 壁の高さは 1,800mm である。想定建物の方立壁と同様の配筋を有する試験体で, 縦・横筋は D10@200 ダブル, 壁端部の縦筋および隅角部の開口補強筋のみ D16 ダブルである。なお, W1 試験体の横筋にはフックなどの特別な構造詳細は設けられていない。試験体の構造諸元を Table1 に, コンクリートおよび鉄筋の材料特性を Table2 および Table3 にそれぞれ示す。

2.2 載荷方法

試験体設置図を Fig.3 に示す。試験体は載荷フレームに設置し正負交番の静的漸増繰返し載荷が行われた。

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (学生会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士 (工学) (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)



Fig.1 Building of interest

| | Prototype | W1 |
|---------------------------|--|--|
| t × D | 150mm × 1050mm | |
| Height | 2000mm | 1800mm |
| Vertical reinforcement | D10@180double (D16double for edge) $p_{vw}=0.52\%$ | D10@200double (D16double for edge) $p_{vw}=0.48\%$ |
| Horizontal reinforcement | D10@180double $p_{wh}=0.52\%$ | D10@200 double $p_{wh}=0.48\%$ |
| Reinforcement for opening | D16 double | |

p_{vw} : Vertical reinforcement ratio of wall

p_{wh} : Horizontal reinforcement ratio of wall

Table2 Material properties of concrete

| Specimen | Elastic modulus | Compressive strength |
|----------|--------------------|----------------------|
| W1 | 2.69×10^4 | 27.7 |

Unit : N/mm²

Table3 Material properties of reinforcement

| Type | Elastic modulus | Yield stress | Tensile strength |
|------|--------------------|--------------|------------------|
| D10 | 1.85×10^5 | 375 | 506 |
| D16 | 1.66×10^5 | 351 | 510 |

Unit : N/mm²

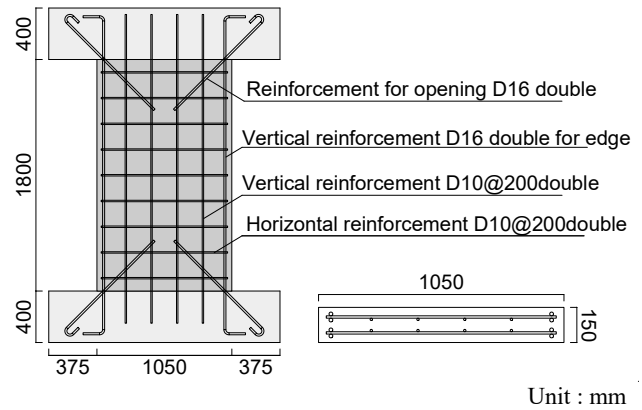
また、上階の梁による方立壁の軸変形拘束を再現するため、上スタブ下面に取り付けた2つの変位が $\delta_s = \delta_N = 0$ となるように鉛直オイルジャッキによって軸力を作用させながら、水平オイルジャッキを用いて水平方向に強制変位が与えられた。

2.3 実験結果

(1) 荷重と変形角関係および破壊経過

試験体の荷重-変形角関係を Fig.4, 破壊性状を後述する解析結果と合わせて Fig.6 に示す。 $R=0.0625\%$ のサイクルにおいて壁の上下端部に曲げひび割れが生じた。 $R=0.25\%$ のサイクルにおいてせん断ひび割れが発生し、また負荷時に横筋の降伏が確認された。その後、 $R=0.5\%$ のサイクルでは最大耐力 604kN が記録された。その直後にせん断破壊による耐力低下が生じたため載荷を終了した。

(2) 圧縮軸力と変形角関係



Unit : mm

Fig.2 Dimensions and reinforcement details of specimen

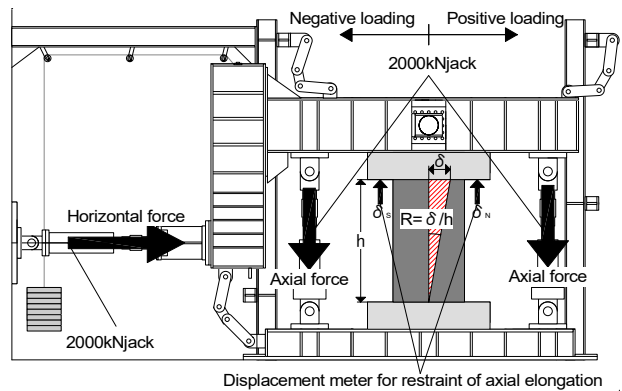


Fig.3 Test set-up

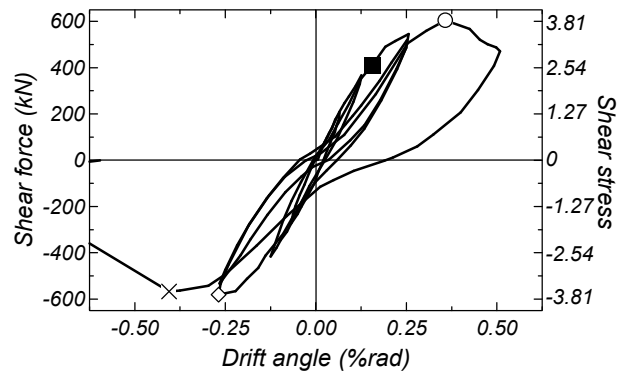
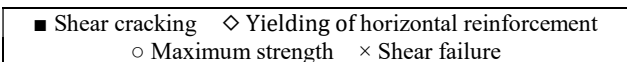


Fig.4 Shear force vs. drift angle relationship

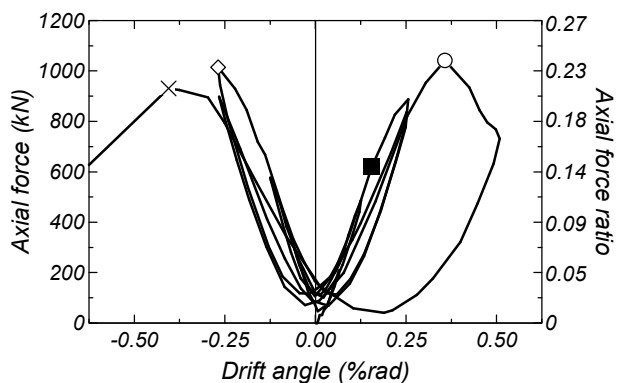


Fig.5 Axial force vs drift angle relationship

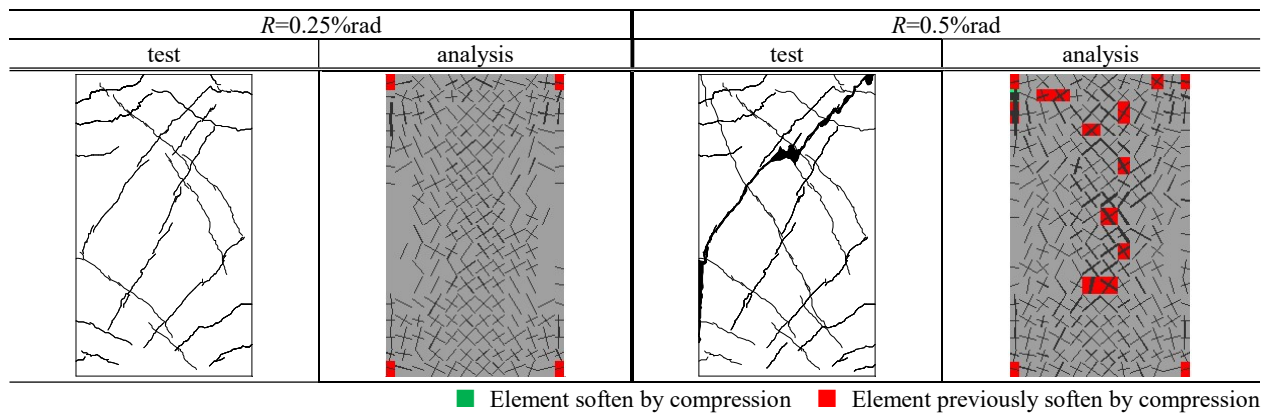


Fig.6 Crack patterns

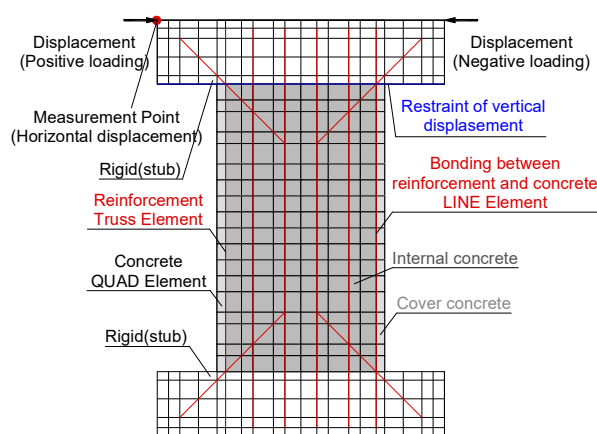


Fig.7 Modeling for FEM analysis

圧縮軸力-変形角関係を Fig.5 に示す。方立壁に作用する圧縮軸力は変形角の進行に伴い上昇し、最大圧縮軸力は 1041kN(軸力比=0.24)が記録された。また、せん断破壊後圧縮軸力を負担できず軸力の低下が見られた。

3. FEM 解析

3.1 試験体のモデル化

FEM 解析のための試験体の要素分割図および境界条件を Fig.7 に示す。二次元の FEM 解析を計画し、平面応力場を仮定した。解析には市販の解析ソフト「FINAL」⁷⁾を使用した。

コンクリートは 4 節点四辺形要素で定義し、3.2 節に示す通り、コア(鉄筋間)コンクリートとカバーコンクリートを分けて設定した。なお、コンクリートのひび割れは非直交ひび割れモデル⁸⁾により表現した。鋼材については壁縦筋および斜め開口補強筋は線材要素でモデル化し、端部縦筋および斜め開口補強筋の定着部に関するフックなどの詳細なモデル化は省略した。内部コンクリートにおける壁横筋は 4 章のパラメトリック解析を想定し、要素の大きさを変更することなく横筋量を変数とできる埋め込み鉄筋とした。また、壁縦筋および斜め開口補強筋とコンクリートの界面にはコンクリートとの付着すべりを考慮した。

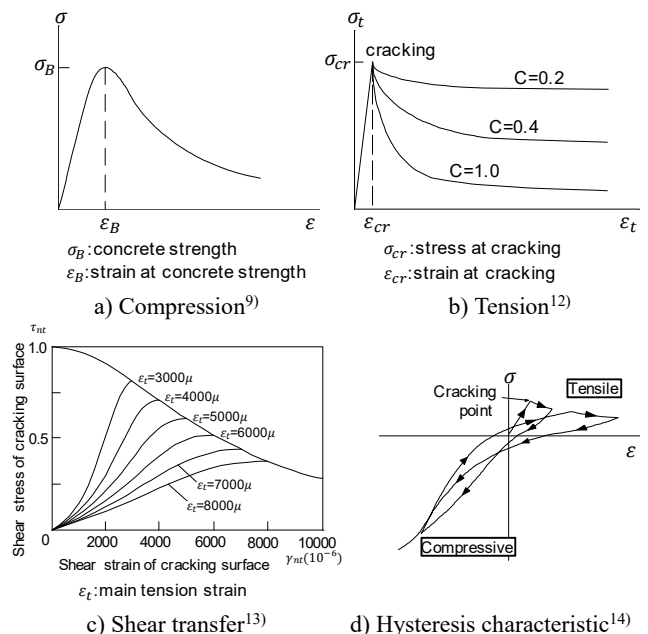


Fig.8 Modeling of concrete element

境界条件は下スタブ下面の節点すべての変位を固定とし、上スタブ下面の節点すべての鉛直方向変位を固定とすることで逆対称の曲げモーメント分布を仮定し、また、実験における方立壁の軸伸びの完全拘束を再現した。上下スタブは剛体とし、上スタブの側面最頂部の節点に強制変位を与えることによる水平载荷を行った。

3.2 材料モデル

コンクリートの材料構成則を Fig.8 に示す。コンクリートの応力-ひずみ関係の上昇域・軟化域はともに修正 Ahmad モデル⁹⁾を仮定し、実験において方立壁にせん断ひび割れが生じたため、方立壁にはひび割れ後の圧縮強度や強度時ひずみの低減を Collins らの提案式¹⁰⁾によって考慮した。二軸応力下の破壊条件は Kupfer らの提案¹¹⁾に従った。テンションステイフニング特性は出雲らのモデル¹²⁾とし、内部コンクリートでは係数 $c=0.4$ とし、カバーコンクリートは壁筋によるコンクリートの拘束効果がないため係数 $c=1.0$ を用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性モデルは長沼の提案モデル¹³⁾を用い、繰返し応力

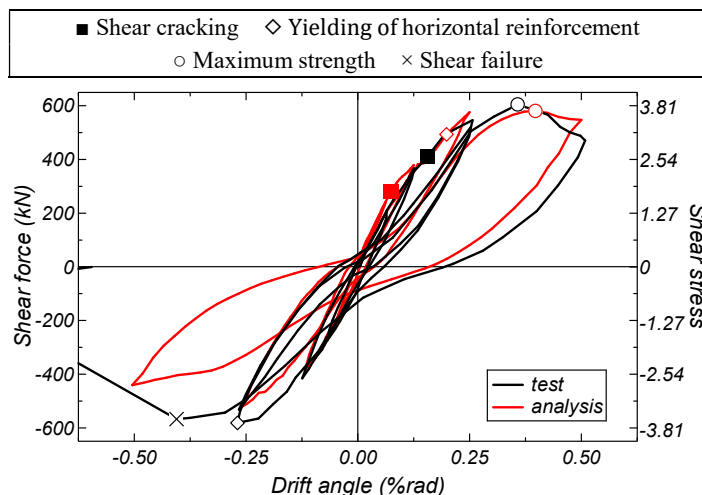


Fig.9 Shear force vs. drift angle relationships and comparisons with the experimental results

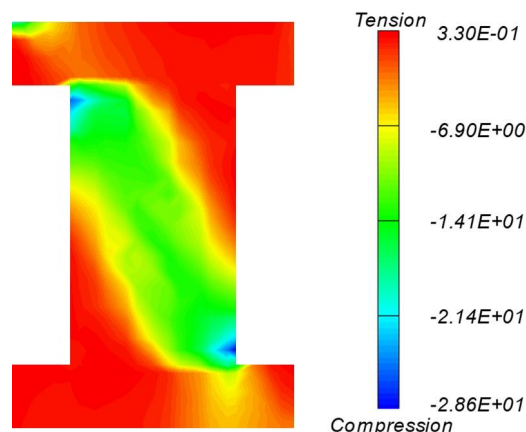


Fig.10 Distribution of minimum stress at $R=0.25\%rad$

下の履歴特性は長沼らのモデル¹⁴⁾を用いた。

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルを適用し、圧縮側・引張側ともに降伏点到達後の剛性は弾性時の0.001倍とした。付着応力-すべり関係はNaganumaらのモデル¹⁵⁾により考慮した。ここで、最大付着応力は靱性指針¹⁶⁾の柱および梁の主筋の柱梁接合部内での付着強度 τ_u (Eq.1)を代用し、最大付着応力時のすべり量は文献¹⁷⁾に従い1.0mmと仮定した。

$$\tau_u = 0.7(1 + \sigma_0/\sigma_B)\sigma_B^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 σ_0 :柱の圧縮軸応力度(柱主筋の付着強度の場合を採用し0とした)、 σ_B :コンクリート強度である。

また、解析における材料特性はTable 2 および3の値を用いた。

3.3 解析結果とその分析

(1) 荷重と変形角関係および破壊経過

実験結果および解析結果における荷重-変形角関係の比較をFig.9に示す。解析結果では正載荷時の初期剛性をやや過大に評価したものの、せん断力およびせん断破壊後の耐力低下を精度よく評価している。

試験体の損傷状況に関する実験と解析の比較をFig.6に示す。なお、同図では解析におけるひび割れ幅を30倍に拡大したものを示している。 $R=0.25\%rad$ の損傷状況においては、実験結果と比べて損傷の範囲がやや広域ではあるが、実験における曲げひび割れおよびせん断ひび割れを概ね良好に再現した。Fig.10の $R=0.25\%rad$ 時の最小主応力図より方立壁に圧縮ストラット見られ、Fig.9に示した方立壁の高いせん断力の伝達が得られた。 $R=0.5\%rad$ においては方立壁全体に損傷が広がっているものの、せん断ひび割れの幅が確認でき、本解析モデルは実験の挙動と概ね良好に対応し、総じて実験を再現したと判断した。

(2) 圧縮軸力と変形角関係

実験結果および解析結果における最大圧縮軸力-変

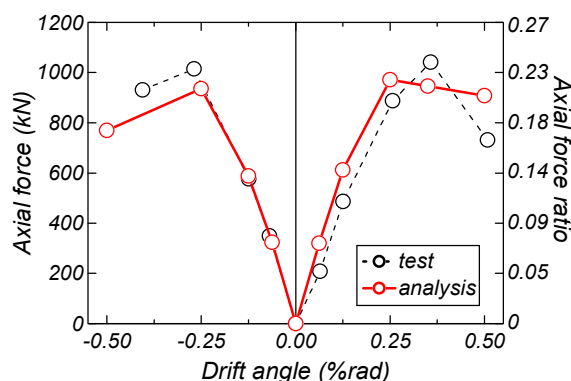


Fig.11 Axial force vs. drift angle relationships and comparison with the experimental results

形角関係をFig.11に示す。図中では実験および解析結果について繰返し載荷の各サイクルピーク時における方立壁に作用する最大圧縮軸力を示している。解析における最大圧縮軸力は方立壁の底面を構成する各要素に作用する鉛直方向応力と要素の断面積の積により要素に働く鉛直方向力を算出し、これらの和として算出した。荷重-変形角関係において初期剛性をやや過大に評価したため、解析により算出した正載荷時の軸力も実験値をやや過大に評価する結果となったが、解析は実験における各サイクルピーク時の軸力とその推移を良好に評価している。

4. せん断補強筋の配筋量をパラメータとした検討

2章の試験体は方立壁が早期にせん断破壊することにより、最大作用軸力は軸力比0.24に留まった。将来的に方立壁を構造要素として利用することを念頭に置くと、方立壁の構造性能、とくに靱性の改善が望ましいが、同時に方立壁の作用軸力なども増大することが予想される。そこで、本稿では方立壁のせん断補強筋量の増強が、方立壁の構造性能や作用軸力に与える影響を定量的に把握するために、せん断補強筋の配筋量を変数とするFEM解析を行った。なお、Fig.9より正負交番の荷重-変形角関

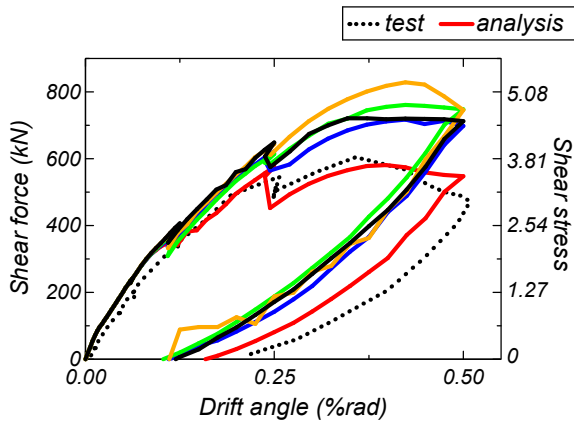


Fig.12 Shear force vs. drift angle relationships with different amounts of shear reinforcement

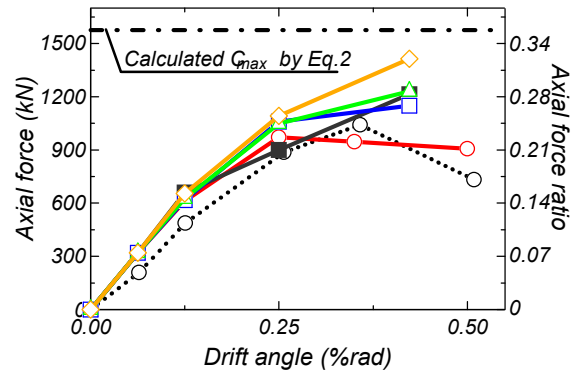


Fig.13 Axial force vs. drift angle relationships with different amounts of shear reinforcement

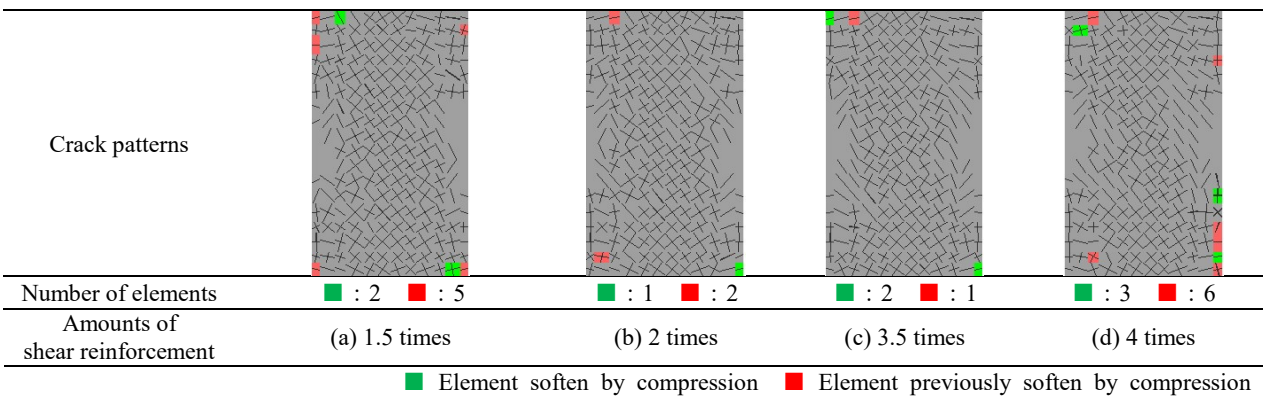


Fig.14 Crack patterns of analysis at $R=0.3\%$ rad with different amounts of shear reinforcement

係のうち正載荷時の包絡線が実験結果と良好に対応した結果を踏まえ、以降の検討においては解析結果として正負交番の荷重-変形角関係のうち正載荷時の包絡線を用いて考察した。

4.1 せん断補強筋の配筋量による影響

せん断補強筋の配筋量を変数としたときの荷重-変形角関係を Fig.12 に、圧縮軸力-変形角関係を Fig.13 にそれぞれ示す。せん断補強筋の増大が方立壁に作用するせん断力および最大圧縮軸力に及ぼす影響を定量的に把握するため、配筋量を 1.5 倍、2 倍、3.5 倍、4 倍（それぞれ $p_w=0.71\%$ 、 0.95% 、 1.66% 、 1.90% ）とし、解析的に検討を行った。

Fig.12 より、せん断補強筋量の増大に伴って二次剛性やせん断耐力が増大することが確認されたが、せん断補強筋量が 4 倍のモデルでは最大せん断耐力は他のモデルと比較して減少した。これは二次剛性の増大に伴い方立壁隅角部のコンクリートが他のモデルより早期に圧壊したことが原因と考えられる。最大圧縮軸力について Fig.13 に示すようにせん断補強筋量の増大に伴い最大圧縮軸力も上昇した。せん断補強筋量を 3.5 倍にした場合の最大圧縮軸力は 1414kN（軸力比 0.32）を記録した。せん断補強筋量を変数としたときの $R=0.5\%$ rad 損傷状況を Fig.14 に示す。せん断補強筋量によって差があるもののどの解析モデルにおいても実験より隅角部コンクリート

の圧壊が顕著に確認された。

4.2 せん断補強筋の配筋量と最大圧縮軸力の推定値¹⁸⁾の関係性

既往の研究¹⁸⁾では方立壁に作用する最大圧縮軸力は、方立壁の危険断面に想定される応力状態（軸方向伸びを拘束したため Fig.15 に示すように中立軸が断面中央に位置すると仮定）に基づいて Eq.2 により推定された。

$$C_{max} = k\beta f'_c t D_w / 2 \quad (2)$$

ここで、 k 、 β ：ストレスブロック法¹⁹⁾による係数（ $k=0.85$ 、 $\beta=0.85$ ）、 t ：壁厚、 D_w ：壁の全せいである。

上式による最大圧縮軸力の推定値を Fig.13 に併せて示す。解析により求めた作用圧縮軸力は推定値の約 90%まで増大することが確認された。推定軸力までは到達しなかったが、これはせん断補強筋量の増大により、剛性の増大なども伴って、方立壁隅角部に高い圧壊応力がより早期に発生したことに起因すると考えられる。筆者らは方立壁を構造要素として利用する手法の提案を目的とし

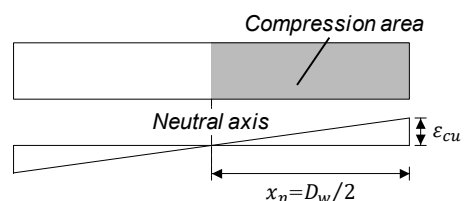


Fig.15 Strain distribution at the cross section of flat wall

ているが、上記のように軸変形が拘束された方立壁には高い圧縮軸力が作用するため、せん断補強筋をロ字型にし、コンクリートの圧壊を抑制する配筋詳細にすることや、壁端部に拘束筋を設けることなど、高圧縮軸力に抵抗できる構造詳細を採用することが望ましい。また、こうした構造詳細により作用圧縮軸力はさらに増大する可能性も考えられるため (Eq.2), 引き続き、実験と解析を併用して検討する計画である。

5. まとめ

本研究では、11階建てのSRC造集合住宅の最下層部を想定し、軸方向伸びを完全拘束した部材単位のRC方立壁を対象とする二次元FEM解析を実施し、実験結果を再現する解析モデルを検討し、また、せん断補強筋量が部材挙動や構造性能に与える影響を検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 提案した方立壁モデルにより、既往実験における荷重-変形関係、履歴特性や損傷等の挙動をおおむね再現することができた。
- 2) 解析結果では、方立壁のせん断補強筋の配筋量を増大することで、方立壁が負担するせん断耐力および作用圧縮軸力が上昇する傾向を確認できた。ただし、配筋量が $p_w=1.90\%$ では方立壁隅角部の早期の圧壊によりせん断耐力および作用圧縮軸力は他の配筋量のモデルと比較して相対的に小さかった。
- 3) 本解析の範囲では、方立壁に作用する最大圧縮軸力は $p_w=1.66\%$ のときに最大値 (軸力比 0.32) を示し、既往の研究¹⁸⁾による推定値の約90%に達した。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)課題番号17H01306(研究代表者:真田靖士)の助成の下に実施した。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 東日本大震災合同調査報告 建築編2, 2015.1
- 2) 建築技術: 建築技術-特集: 熊本地震における地震特性と建築物の被害-1, No.803, 2016.12
- 3) 堀田久人, 角田拓也: RC架構の保有水平耐力及び変形性能に及ぼす曲げ降伏先行型方立壁の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.582, pp.131-pp.136, 2004.8
- 4) 小塩友斗, 真田靖士, 金裕錫: 主体架構と一体のRC造方立壁の構造性能評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.713, pp.1145-1153, 2015.7
- 5) 真田靖士, 尹ロク現, 赤堀巧, 小塩友斗, 崔琥: 東

日本大震災で被災した靱性型コンクリート系建築物の被害シミュレーション-RC造方立壁が靱性型コンクリート系建築物の構造性能に与える影響-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.729, pp.1893-1902, 2016.11

- 6) 松尾啓斗, 水谷駿介, 尹ロク現, 真田靖士: RC造方立壁の損傷制御法に関する提案と検証, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.41, No.2, pp.757-pp.762, 2019
- 7) 伊藤忠テクノソリューションズ: FINAL/V11 HELP
- 8) 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, No.544, pp.125-pp.132, 2001.6
- 9) 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, No.474, pp.163-pp.170, 1995.8
- 10) Vecchio, F.J., Collins, M.P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-pp.231, 1986
- 11) Kupfer, H.B., Gerstle, K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.99, No.EM4, pp.853-pp.866, 1973.8
- 12) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-pp.120, 1987.9
- 13) 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, No.421, pp.39-pp.48, 1991.3
- 14) 長沼一洋, 大久保彰章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.536, pp.135-pp.142, 2000.10
- 15) K.Naganuma, K.Yonezawa, O.Kurimoto, H.Eto: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled model using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, No.586, 2004.8
- 16) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp.255, 1999
- 17) fib: fib Model Code for Concrete Structure 2010, 2013.12
- 18) 福井紳矢, 真田靖士: 梁の拘束によりRC造方立壁に作用する軸力の解析的分析, 日本建築学会構造系論文集, pp.459-pp.460, 2018.7
- 19) ACI(American Concrete Institute): Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14), American Concrete Institute, U.S., 2014.9