

論文 有開口 RC 造耐震壁のせん断抵抗機構に関する解析

LAI THI HOA^{*1}・JONATHAN MONICAL^{*2}・前田 匡樹^{*3}・菅原 裕太^{*4}

要旨： RC 造耐震壁の開口部が壁の耐力等の構造性能に及ぼす影響を評価するための力学モデルは限られており、耐力・剛性の低下メカニズムは十分には明らかではない。そこで本研究では、弾性トラス解析モデルとトラス・アーチ理論に基づく塑性解析モデルを用いて、既往の有開口壁板試験体の構造性能を評価した。開口の大きさをパラメータとして、壁筋の降伏の進展状況と終局時の 4 段階の耐力を検討した。その結果、提案モデルは実験結果の壁筋の降伏進展の傾向と終局耐力を概ね再現できることが確認できた。また、実験で測定や観察が困難な圧縮力の分布を推定し、有開口壁の応力伝達経路の傾向を捉えることができた。

キーワード： RC 造耐震壁, 開口, せん断耐力, トラスモデル, トラス・アーチ理論, 弾性解析, 塑性解析

1. はじめに

RC 造耐震壁は、建築構造物の水平耐力と剛性を高め、より高い耐震性能を確保することに有効な構造要素である。耐震壁には、窓、出入り口、換気設備配管など様々な目的で開口を設けることが一般的である。耐震壁に設ける開口は、せん断力の伝達機構を複雑にし、耐力や剛性の低下のメカニズムは十分には明らかになっていない。現在、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(以下、RC 規準)¹⁾や日本建築学会の「鉄筋コンクリートの靱性保証型耐震設計指針・同解説」(以下、AIJ・靱性保証指針)²⁾で示された手法が一般的に用いられている。前者は無開口耐震壁のせん断終局強度に開口低減率を乗じる手法であり、後者は開口左右の片側袖壁付き柱のせん断強度の和とする手法である。しかし、前者は壁板に対する開口の面積の比率からせん断強度を算定するため、応力伝達経路が明確ではなく、後者は開口左右上下のせん断力伝達経路を考慮せずに過大評価してしまう場合がある。

そこで、本研究では、耐力の低下メカニズムを検討することを目的として、開口耐震壁を弾性トラスに置換した弾性解析モデルと、塑性理論に基づくトラス・アーチ解析モデルを用いて、開口の大きさの異なる 3 つの耐震壁の耐力を推定し、既往実験と比較検討した。上記の 2 つの解析方法のうち、弾性解析は鉄筋の降伏強度を上限とすることで部材の非線形領域の挙動を再現することは不可能であるが、壁筋が最初に降伏する位置や耐力、開口部周辺の応力の伝達経路、壁の弾性剛性などを推定・評価することができる。一方、トラス・アーチ機構に基づく方法は、壁の終局強度をマクロ的な簡易モデルを用いて推定する方法である。

2. 解析対象概要

2.1 試験体概要

本論文での検討の対象には、2020 年に実施された壁板要素実験³⁾の試験体を用いた。

試験体の特徴を表-1、図-1に示す。試験体は、開口を有する正方形 RC 造壁板で、形状は 600mm×600mm、厚さは 60mm である。開口は正方形で、試験体の中央部に位置する。開口の大きさは、開口周比($=\sqrt{h_0 l_0 / h l}$, 以下 OAR と略記)が 0.4 以下という RC 規準に基づき、OAR が 0.4 の 1/3, 2/3, 1.0 となるような大きさである。壁筋は D6@40、鉄筋比=1.33%のシングル配筋で、補強筋が追加されていない。試験体に

表-1 解析試験体一覧

試験体	試験体寸法 l×h×t (mm)	開口寸法 l ₀ ×h ₀ (mm)	開口周比 $\sqrt{l_0 h_0 / l h}$	壁筋比
S80	600×600×60	80×80	0.13	1.33%
S160		160×160	0.27	
S240		240×240	0.4	

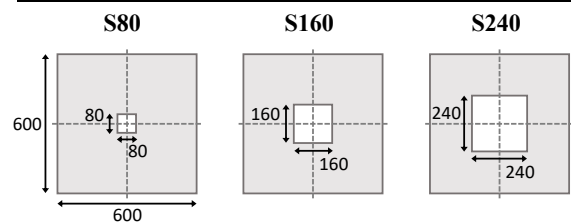


図-1 試験体の開口の特徴

表-2 材料試験結果

コンクリート	Ec (kN/mm ²)	26
	σ _B (N/mm ²)	32
鉄筋 D6-SD295	Es (kN/mm ²)	170
	σ _y (N/mm ²)	315

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 研究員 Ph.D. (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

*4 東北電力(株) 土木建築部 修(工学) (会員外)

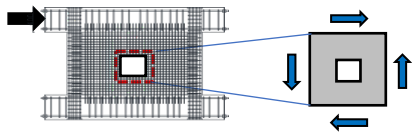


図-2 加力システムのイメージ

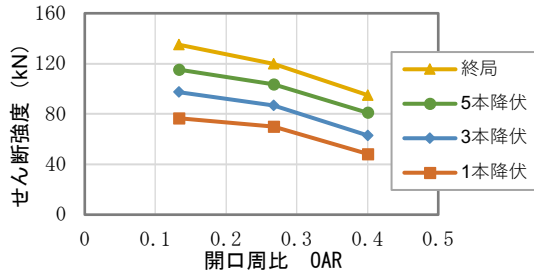


図-3 実験結果

使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。加力は、純せん断力を作用させる加力装置のもとで、壁試験体の4周の加力鉄板に接合される4本のジャッキを用いて、荷重がほぼ等しくなるように制御し、正負繰り返し載荷で行われた。加力システムのイメージを図-2に示す。その他、試験体の詳細については文献3)を参照されたい。

2.2 結果概要

本研究では、鉄筋の降伏の進展状況に応じた耐力及び終局時の耐力の検討を行うこととするため、実験で壁鉄筋が初めて降伏する時、3本が降伏した時、5本が降伏した時の降伏荷重及び最大荷重を調べた。図-3にその実験結果を示す。図に示すように、開口が大きくなるに従い、せん断荷重が低下する傾向が確認できる。各試験体における鉄筋1本、3本、及び、5本が降伏した時の荷重は、それぞれ最大荷重の約55%、70%、85%である。

3. 解析方法

本研究では、図-4に示すように耐震壁の壁筋を水平材及び鉛直材に、コンクリートの斜め圧縮力を斜材に置換した弾性トラス解析と、図-7に示す塑性理論に基づくトラス・アーチ機構に基づく解析の2種類の解析を行い、2章に示した実験結果と比較した。

3.1 弾性解析トラスモデル

弾性解析モデルは、図-4、図-5に示したように、壁筋を水平材・鉛直材で、コンクリートを斜材でモデル化する。水平材・鉛直材の断面積は、水平壁筋・鉛直壁筋それぞれ16本の合計断面積をトラスのグリッド分割数 n で割り均等に分配し、ヤング係数は壁筋の材料試験値を用いた。斜材の断面積は、コンクリートの斜め圧縮ストラット幅に壁厚を乗じて求めた。ここで、隣接する解析要素との分布を考慮し、コンクリー

トの斜め圧縮ストラット幅はグリッドの幅の半分 ($l_g/2$) と高さの半分 ($h_g/2$) からなる斜辺の長さとして仮定する。斜材のヤング係数も同様に、コンクリートの材料試験値を用いた。解析モデル下部の両端節点にピン・ローラーによる支持条件を用いた。壁部材のトラスモデルへの分割は、大中小の3種類の異なる分割(具体的には、縦横3分割、6分割、14分割)を試みた。これは、分割要素のサイズを変化させることで、簡単な弾性解析モデルを用いて、弾性状態から、ある程度壁筋などの塑性化が進展した状態を再現できる可能性を調べる目的のためである。

荷重の設定については、実験ではせん断力が試験体の各辺に均等に伝達されるので、これを解析で再現するために、4辺の各最外節点の支配範囲に応じて分布

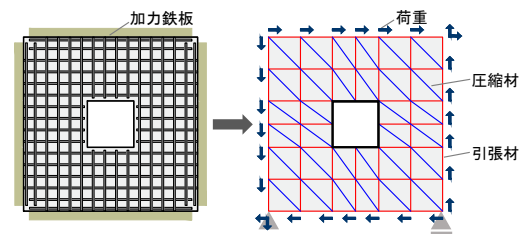


図-4 試験体の配筋図及びトラスモデル図

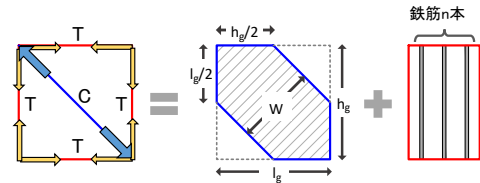


図-5 解析要素の概要

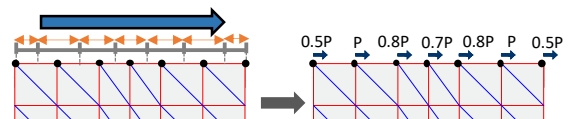


図-6 荷重設定

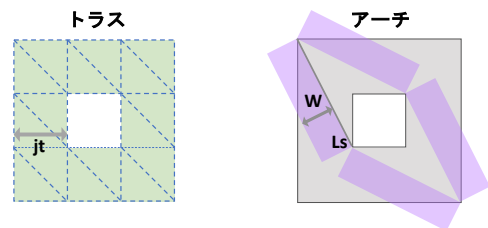


図-7 塑性解析モデル

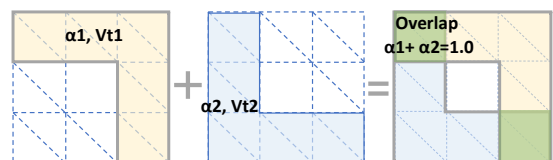


図-8 トラス機構における有効強度係数の概要

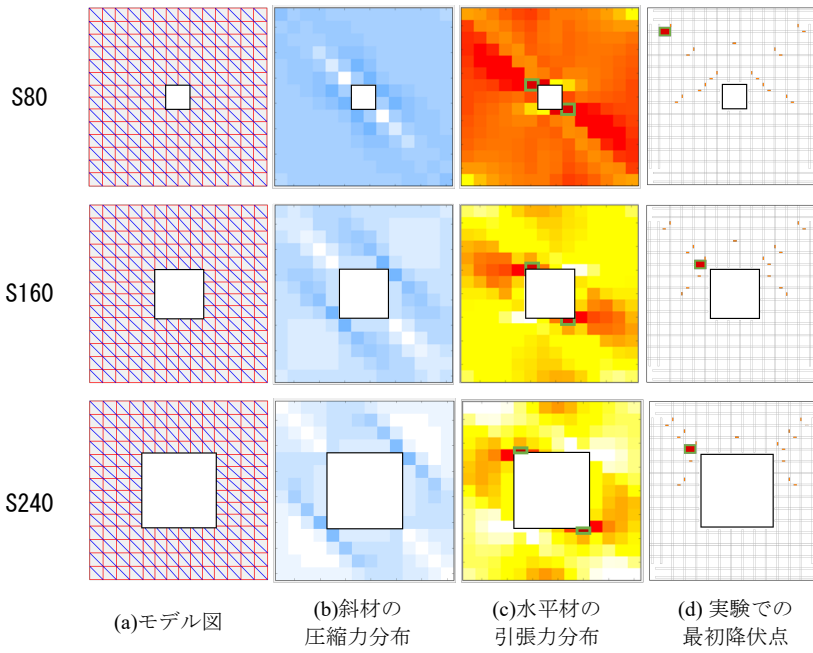


図-9 小分割モデルの解析結果

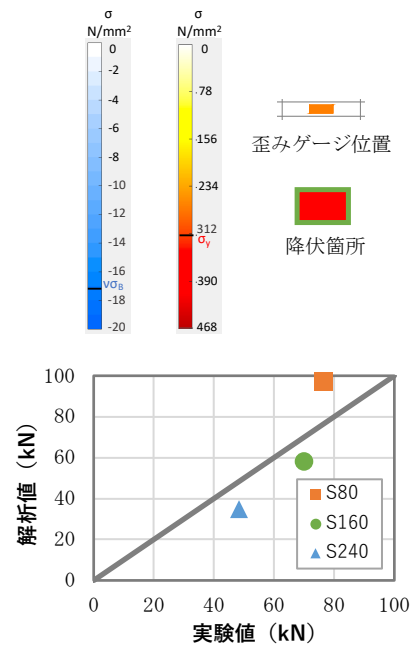


図-10 強度に関する小分割モデルの解析値と実験値の比較

させた(図-6)。解析は、荷重を漸増させ、水平材・鉛直材のいずれか1か所が降伏強度に達した時点、または斜材が有効圧縮強度に達した時点で終了した。解析手法には剛性マトリックス法を用いた。

3.2 塑性解析モデル-終局時

終局塑性解析モデルでは、AIJ・靱性保証指針²⁾で提案されているトラス機構・アーチ機構によるモデルの考え方を基本に、開口左から下と、開口上から右へとつながる2つの力の流れを考慮するように改良したモデルである(図-7)。解析は、力の釣り合い条件と同時に、すべての鉄筋が降伏し、コンクリートが有効圧縮強度に達した条件を用いた。

ここで、2つのトラスモデルの負担せん断力 V_t の考え方について述べる。トラス機構は、コンクリート斜め圧縮力の傾斜角度は 45° とし、式(1)により、トラス機構の負担せん断力 V_t を算出する。ここで、壁筋の降伏強度 σ_y には有効強度係数 α_i を用いて低減する。有効強度係数 α_i は、壁の隅角部で、開口左下(図-8の黄色)と右上方向(図-8の水色)の2つのトラス機構が重なることから、隅角部では壁筋が降伏強度に達するのに対して、左下方向と右上方向の2つの経路に別れた部分では、壁筋応力が分配されて降伏強度には達しないことを考慮する係数である。開口を除いた左右2つの経路でせん断力を伝達する壁筋応力を、 α_1 、 α_2 を用いて分配することで、各経路における V_{t1} 、 V_{t2} を求めることができる。開口の隅角部は2つの経路が重なる部分であり、 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1.0$ となっている。アーチ機構の負担せん断力 V_a は、トラス機構に釣り合

うコンクリート応力を除いた有効圧縮強度 $(1 - \beta) \cdot v\sigma_B$ と壁厚 t 、ストラット幅 W_i から求まる。ここで、ストラット幅 W_i は、文献4)を参考に、ストラット長さ L_s の0.25倍とした。

以上より、 V_t と V_a は式(1)~(4)によって求める。

$$V_t = \alpha_i \cdot p_w \cdot \sigma_y \cdot t \cdot \sum j_t \quad (1)$$

(本論文では $\alpha = 0.5$ とする)

$$V_a = \sum_{i=1}^2 (1 - \beta) \cdot v\sigma_B \cdot t \cdot W_i \cdot \cos\theta_i \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot p_w \cdot \sigma_y}{v\sigma_B} \quad (3)$$

$$W_i = 0.25 \times L_s \quad (4)$$

ここで、 α ：壁筋有効強度係数、 p_w ：鉄筋比、 σ_y ：鉄筋降伏強度、 t ：壁厚、 j_t ：トラスせい、 v ：コンクリート圧縮強度の有効係数、 σ_B ：コンクリート圧縮強度、 W ：ストラット幅、 θ ：斜め圧縮ストラットの角度、 L_s ：圧縮ストラット長さ

4. 解析結果と実験結果による壁強度の変化傾向

4.1 一部部材が降伏するときの解析結果

(1) 小分割モデル

小分割モデルはグリッド線が鉄筋の数とほぼ等しいので、壁筋が初めて降伏する場合を想定している。解析では、開口の隅の近くにある水平材・鉛直材が最初に降伏強度に達し解析が終了した。各試験体のモデル図、斜材(コンクリートの)の圧縮力分布と水平材の引張力分布の解析結果、鉄筋降伏位置の実験結果を図-9に示す。

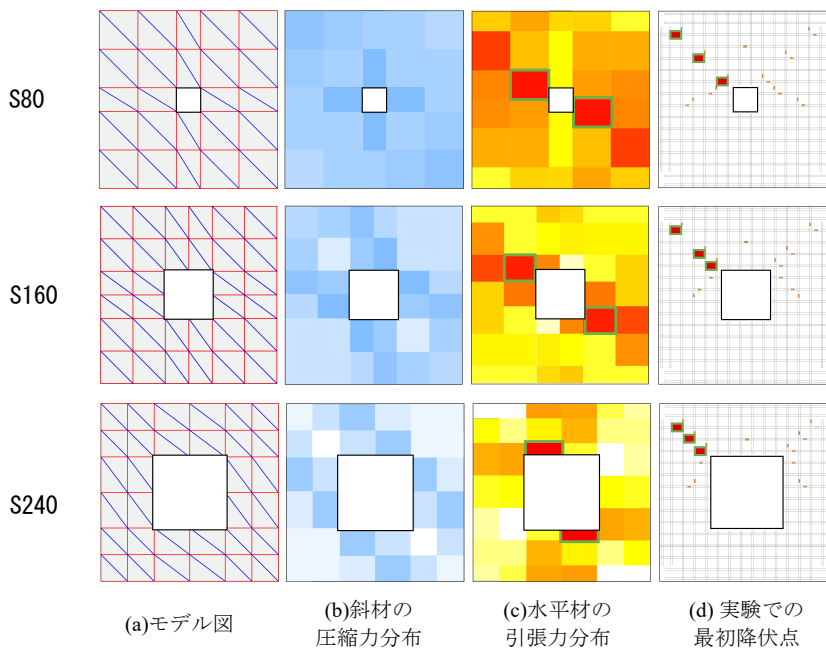


図-11 中分割モデルの解析結果

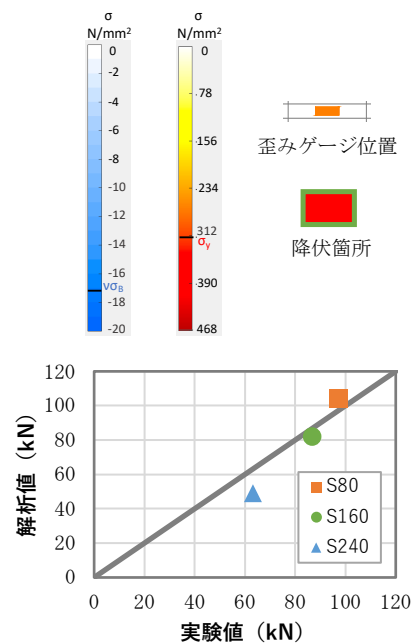


図-12 強度に関する中分割モデルの解析値と実験値の比較

解析の結果、圧縮力の分布は、開口のすぐ脇に対角方向に圧縮応力の高い領域が存在する。いずれの開口率の試験体も、圧縮力は試験体の左上隅から、開口部の周囲（左下隅と右上隅）に広がり、試験体の右下隅に伝達される圧縮ストラットが形成している様子が確認できた。最も圧縮力の高い領域は、開口の左下隅と右上隅である。一方、圧縮力が最も小さい領域は、開口の左上隅と右下隅である。このことは、図-7 に示したように、圧縮ストラットが、開口を避けて2つの経路に分かれ応力を伝達していくことを示唆している。水平材の引張力分布の解析結果は開口に隣接する鉄筋が最初に降伏する傾向を示しており、これは実験データと一致している。しかし、最も開口が小さい試験体 S80 では、実験データから、最初に降伏した鉄筋は試験体の左上隅にあり、開口に隣接する鉄筋がそのすぐ後に続くことが示されている。一方、試験体 S80 の解析結果によると、最初の鉄筋が降伏する時点で開口と試験体の隅の間のほとんどの鉄筋が降伏に近づいており、どの鉄筋も同じように最初に降伏に達する可能性が高いことが示されている。解析の結果から、引張応力・歪みが開口の左上隅と右下隅に集中していることが分かり、ここに補強筋を設置することが有効であることが分かった。

各試験体の解析結果におけるコンクリートと壁筋の応力分布を比較すると、開口が小さいほど応力度が一様で、開口が大きくなると開口周囲に応力が集中していることが分かる。

せん断強度の解析値と対応する実験値の比較を図-

10 に示す。試験体 S160 と S240 における解析結果が実験値よりも低い荷重を示しているのに対し、試験体 S80 では実験値を上回る結果が得られた。トラスモデルでは、水平材と鉛直材を壁筋のみでモデル化しているため、鉄筋が降伏するまでのコンクリートの拘束力や、ひび割れの発生状況、損傷集中状態の再現が不十分である。開口部が小さい試験体 S80 では、実際の損傷が開口部周辺により集中することを考慮せずに、解析上では健全な範囲が広がり、実験値よりも高い荷重で鉄筋が降伏することを示した。一方で、開口部が大きい試験体では、応力集中と損傷位置が実験結果と比較的一致していたが、鉄筋がコンクリートにより拘束されることを考慮せずに解析モデル化したため、実験値よりも低い荷重で鉄筋が降伏する結果になった。

(2) 中分割モデルの解析結果

中分割モデルは、開口と試験体の角の間に位置する2, 3本の鉄筋が降伏に達したことに相当する。小分割モデルと同様に、開口の隅の近くにある水平材・鉛直材が先に降伏強度に達し、解析が終了した。図-11 にモデル図、解析結果の圧縮力分布と引張力分布、実験結果の鉄筋降伏位置を示す。試験体の角から開口部の角までの対角線上にある鉄筋が降伏に達しており、これは実験データと一致している。

コンクリートの斜め圧縮力分布に関しては、圧縮ストラットが明瞭に現れ、2つの経路で伝達されること、開口の左下隅と右上隅に集中することが確認され、これは小分割モデルと同様の傾向である。降伏鉄筋の本数が増えるにつれて、圧縮力がより周囲に広がること

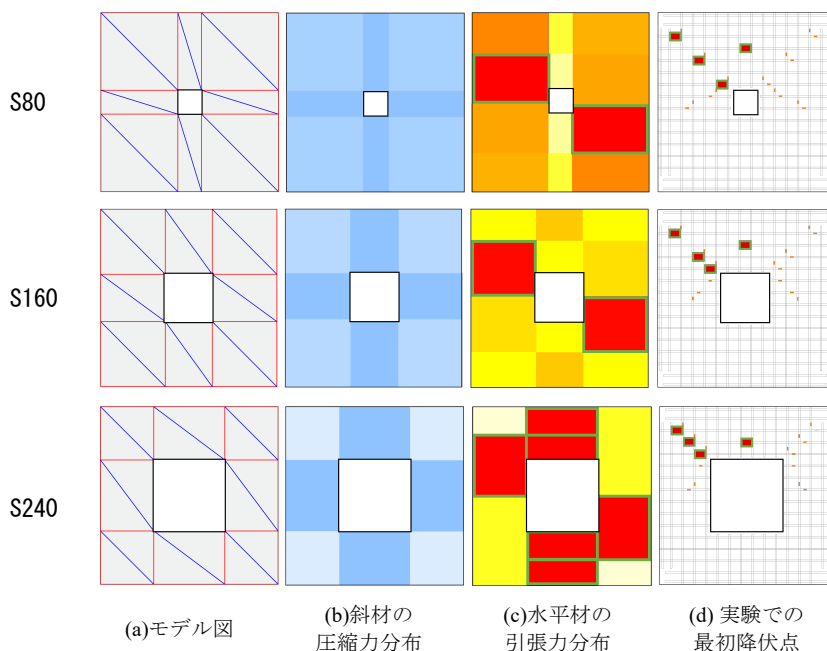


図-13 大分割モデルの解析結果

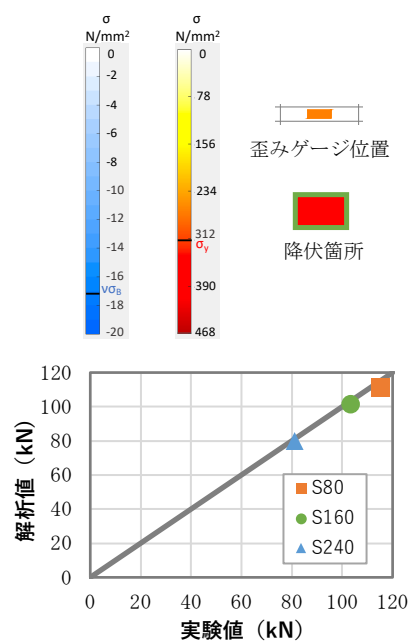


図-14 強度に関する大分割モデルの解析値と実験値の比較

が観察され、これは荷重が増加するにつれて圧縮ストラットの幅が増加するためと考えられる。

せん断強度の解析値と実験値の比較を図-12に示す。壁板隅角部の鉄筋の約半分が降伏する荷重の実験値と解析値は概ね一致し、平均誤差は15%以下である。中分割モデルでは、特定の範囲内の鉄筋を集約して表現することで、ひび割れの発生位置や進行状況をその範囲全体の挙動として総合的に評価している。このアプローチにより、小分割モデルに比べて、解析結果と実験結果との差異が低減されている。

(3) 大分割モデルの解析結果

大分割モデルでは、グリッド線が鉄筋の4, 5本分を集めたもので、鉄筋の大部分が降伏する場合である。図-13にモデル図、解析結果および実験結果を示す。このモデルは、部材内の壁筋の降伏・塑性化がある程度進展した状態を大まかに把握する傾向を検討する場合に適している。解析結果から、圧縮力の分布は開口の周辺に最も集中し、引張力は開口の隅に最も集中することは、小分割・中分割モデルと同様の傾向である。また、圧縮力・引張力が集中する現象は、開口部が大きくなるほど顕著になる。この現象は小分割モデルでも中分割モデルでも発生した。この局所的な応力集中が開口壁の強度低下の原因と考えられる。強度に関しては、解析結果と実験結果はよく一致しており、平均誤差は5%未満である(図-14)。

4.2 終局時の解析結果

せん断終局強度は、トラス・アーチ機構に基づく塑性解析モデルによる計算法を用いて実験値と比較した。

対象とした試験体は中央に正方形の開口部を持つため、その対称性を考慮して壁筋の有効強度係数は $\alpha = 0.5$ とした。解析値と実験値の比較を図-15に示す。解析値は実験値を若干下回るが、解析値と実験値の誤差は平均5%以下である。解析の結果、開口部が大きくなるにつれて、試験体S160の強度は試験体S80に対して約15%低下し、試験体S240の強度も試験体S160に

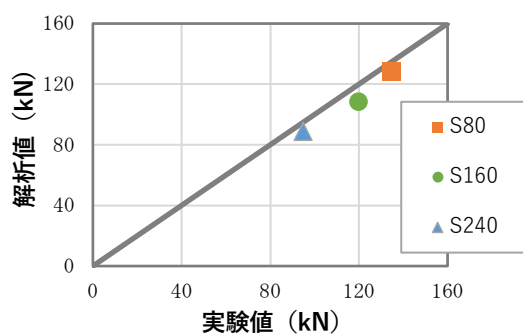


図-15 塑性解析における解析値と実験値の比較

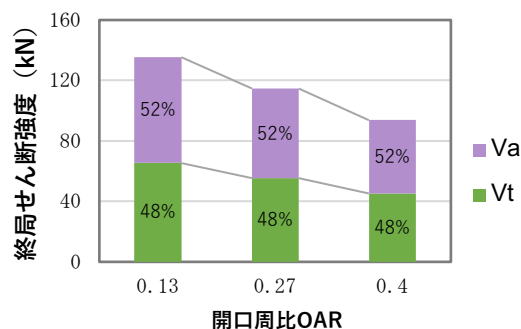


図-16 トラス・アーチ機構の負担せん断力

対して約17%低下しており、強度がほぼ線形的な低下傾向を示した。また、図-16に示すように、トラス機構とアーチ機構が負担するせん断力は約半分ずつであり、開口部の大きさが変わってもその比率は変わらない。開口によって鉄筋の減少とコンクリートの欠如がトラス機構とアーチ機構の両者に影響し、強度を低下させていることがわかる。

4.3 解析結果と実験結果の比較のまとめ

図-3に示した各段階のせん断力実験値と、ここまでに示した解析結果の比較を図-17に示す。全体として、開口が大きくなると鉄筋降伏時および終局時とも強度が低下する傾向が解析でもとらえることができた。

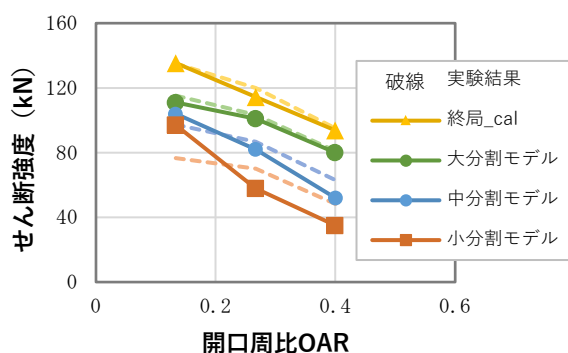


図-17 解析結果のまとめ

弾性解析により、壁筋の降伏位置の推定が可能となり、開口壁における応力集中の傾向も適切に再現できている。図-17によると、大分割モデルになるに従い実験結果と一致する傾向となる。小分割モデルでは、コンクリートとの拘束が影響すると考えられるがそれを考慮しないため、解析結果と実験結果に差が生じるが、その反面、分割が細かいので個々の部材の挙動を詳細に把握することができるという利点がある。

塑性解析は図-7, 8で仮定したモデルを用いて実施している。つまり、塑性解析モデルは、壁板の隅角部で、トラス機構によるコンクリート圧縮ストラット応力度 σ_t とアーチ機構によるストラット応力度 σ_a の合計がコンクリートの有効圧縮強度 $\nu\sigma_B$ に達したときに終局強度に達すると仮定している。この方法による終局強度は実験結果を精度良く評価できている。しかしながら、図-13(b)の弾性解析モデルによる応力分布では、最大の圧縮力が壁板の隅角部ではなく、開口部の横に存在することが示されているのに対し、図-8の塑性解析では隅角部であり両者で一致していない。弾性解析は壁のせん断変形が0.3%程度、塑性解析では0.4%以上の終局変形時との違いはあるが今後の課題として残されている。

5. まとめ・結論

本研究で、弾性解析トラスモデルとトラス・アーチ理論に基づく塑性解析モデルを用いて、開口を有する壁板試験体の構造性能を評価した。

本研究で得た知見を以下に記述する。

- (1) 弾性解析において降伏する鉄筋の位置は、実験結果と概ね一致した。また、引張材の応力分布を推定した結果、引張応力・歪みが最も集中する箇所は開口の隅であることが分かった。
- (2) トラス・アーチ理論に基づく塑性解析モデルでは、トラス機構における壁筋応力の分配を考慮した壁筋の有効強度係数 α を導入し、 V_t の評価式を改良したモデルで、せん断終局強度を算出した。計算結果は実験結果に比較的近く、開口壁のせん断終局強度をよく評価できた。
- (3) 開口が大きくなるにつれ一部の鉄筋が降伏する場合の強度や終局時の強度は低下する傾向が見られた。圧縮力・引張力が開口部周りに局所的に集中することが開口壁の強度低下の原因であり、それが解析結果により評価できた。
- (4) 本研究で検討した壁板は中央部に正方形の開口部を持つため、開口面積の増加に伴い終局強度が線形的に低下する傾向を示したが、形状や位置の違いによる強度低下については、今後の課題である。

謝辞

本研究は、建築研究所 関松太郎氏には多大なるご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

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，2018.12
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリートの靱性保証型耐震設計指針・同解説，1998.8
- 3) Zasih, T., Hamood, A., Masaki, M., Kazuya, T. : Seismic Response Of Reinforced Concrete Walls With Opening: Experiment And Strut-And-Tie Method, コンクリート工学年次論文集，第44巻第2号，pp.529-534，2022.7
- 4) LAI THI HOA, 他：開口部が鉄筋コンクリート造壁の耐力及び剛性に及ぼす影響の検討 その7 日本建築学会学術講演梗概集，pp.169-170，2023.9