

論文 枠柱が耐震壁のせん断性状に与える影響に関する有限要素法解析による検討

遠山 誉*1・鈴木 卓*1・真田 靖士*2・市之瀬 敏勝*3

要旨: 筆者らによる既往の実験研究で用いた, 枠柱の有無をパラメータとするせん断破壊型耐震壁を対象に, FEM 解析を行った。その結果, 試験体の耐力や破壊性状をおよそ再現することができた。さらに, 枠柱の大きさや, 既往のせん断耐力評価式での構造特性をパラメータとする解析を行った。その結果, 枠柱の有無はせん断耐力に影響しないが, 局所的なひずみ挙動や水平抵抗機構に影響することがわかった。また, 既往のせん断耐力評価式でせん断耐力を概ね評価できることを確認した。

キーワード: 構造設計, 耐震壁, FEM, せん断強度, 破壊メカニズム

1. はじめに

近年, 鉄筋コンクリート構造の設計に厳密なモデル化と検証が要求されるようになってきている。設計の高い自由度や合理化を確保するため, 耐震壁に関する枠柱省略条件の検討が求められている。

既往の研究¹⁾では, 枠柱の有無をパラメータとしたせん断破壊型耐震壁に対して水平加力実験を行い, 基本的なせん断性状を明らかにし, 実用的なせん断終局強度評価法を提案している。

本研究では, 既往の研究¹⁾で用いられた枠柱の有無をパラメータとするせん断破壊型耐震壁を対象とし, 非線形有限要素法解析(以下, FEM 解析)を行った結果を報告する。代表的な試験体の実験結果を解析的に評価し, とくに実験では計測できない応力度やひずみ度などの詳細な挙動に着目して検討する。また, 枠柱の大きさや既往のせん断耐力評価式での構造特性である, 引張鉄筋

比や壁板のせん断補強筋比をパラメータとする FEM 解析を行い, これらが耐震壁のせん断性状に与える影響や既往のせん断耐力評価式の妥当性について検証する。

2. 研究対象

研究対象とした試験体断面図¹⁾を図-1に示す。試験体は枠柱の有無がパラメータとなっており, Bタイプは左右に非対称な柱があり, 200mm 角の柱は RC 規準(1999)²⁾の推奨条件を満たす最小断面の柱を想定している。AタイプはBタイプと断面積が等価となるように一端の枠柱を省略し, 壁厚を増した試験体である。A'タイプはAタイプと同じ断面であるが, 壁圧縮となる場合がAタイプ, 柱圧縮となる場合がA'タイプである。また仮想の試験対象として, 枠柱の大きさや, AタイプとA'タイプの試験体の引張鉄筋比, 壁板のせん断補強筋比を変更した試験体も扱うが, 詳細は後述する。

3 解析方法

3.1 モデル化方法

解析にはFINAL³⁾を用いて, 3次元のFEM解析を計画した。コンクリートは六面体要素に置換し, 壁筋および帯筋は要素内で埋め込み鉄筋として扱った。また, 主筋はトラス要素に置換した。ただし, 解析対象は幅方向に左右対称であるため, 片側半分のみをモデル化した。上記の方法によるBタイプの解析モデルを図-2に例示する。また, 材料試験の結果を表-1, 2に示す。

コンクリートと鉄筋の材料構成則を図-3に示す。コンクリートの応力-ひずみ関係は, 圧縮側を修正 Ahmad モデル⁴⁾により, 3軸応力下の破壊条件として大沼らの係数を用いた5パラメータモデル⁴⁾を考慮してモデル化した。但し, 試験体のコア部分には, コンクリートの拘

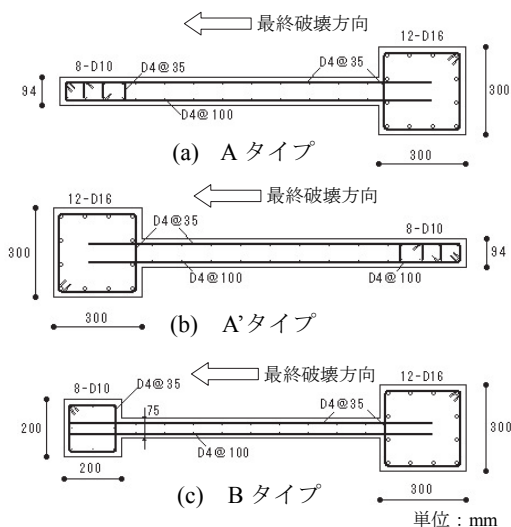


図-1 試験体断面図

*1 豊橋技術科学大学 大学院生 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 名古屋工業大学 教授 工学博士 (正会員)

束効果を考慮できる、New RC での成果を参考にしたモデル⁵⁾を適用した。引張側は出雲らの提案するモデル⁶⁾(コア： $c=0.4$ ，カバー： $c=1.0$)による。また、コンクリートの繰り返し応力下における履歴モデルは、除荷と再載荷過程における軟化挙動を考慮し、ひび割れ発生後のせん断伝達特性には長沼の提案モデル⁷⁾を用いた。

一方、鉄筋の繰り返し応力下における材料構成則は、降伏後の剛性低下(剛性低下率=0.001)を考慮したバイリニアモデルを用いた。コンクリートと鉄筋の繰り返し付着応力-すべり関係は、Elmorsi らのモデル⁸⁾によって考慮した。

尚、構造実験の試験体を対象とする解析では、実験時に観察された初期ひび割れの影響を考慮するため、初期ひび割れ発生位置のコンクリート要素の引張強度を無視した。

3.2 加力方法

加力方法について、鉛直方向には構造実験¹⁾と同様に、スタブ上端より軸力を計 400kN 作用した。また、水平方

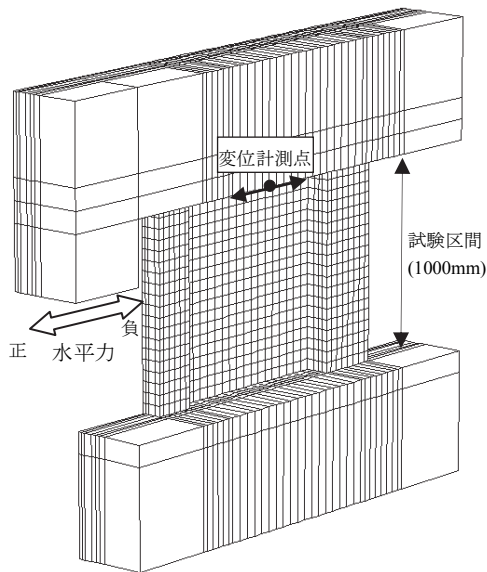
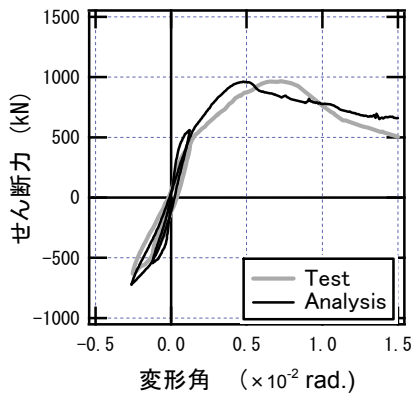
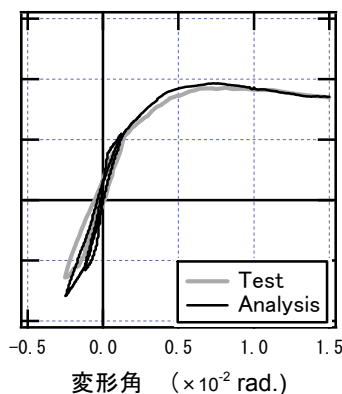


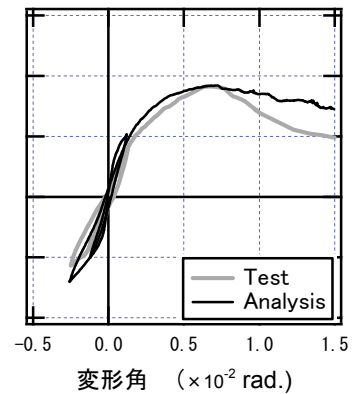
図-2 Bタイプの要素置換方法



(a) Aタイプ



(b) A'タイプ



(c) Bタイプ

図-5 実験と解析の荷重 - 変形関係の比較

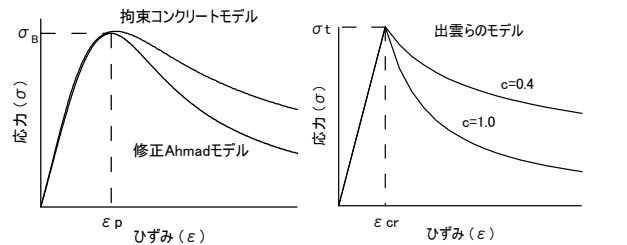
向には層間変形角 1/400rad.まで静的な正負交番繰り返し載荷とし、その後は試験体を最終的に破壊した方向への単調載荷とした。ただし、水平載荷は図-2 に示す変位計測点における水平変位により、制御した。図-4 に載荷サイクルを示す。尚、図-2 に示すように、実験時の水平力載荷高さを模擬するため、スタブ下方に加力用の張出部分を設け、弾性体でモデル化した。尚、正方向載荷は図-1 において右から左である。

表-1 コンクリートの材料特性

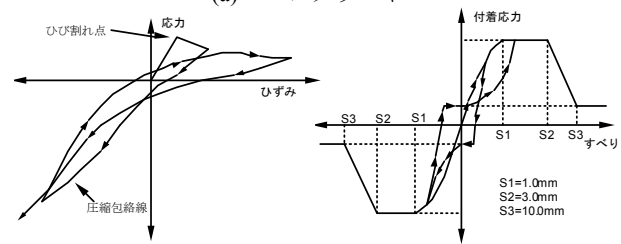
圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
33.3	27.0	2.6

表-2 鉄筋の材料特性

種別	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)
D4	423	594	161
D10	385	534	184
D16	371	578	172



(a) コンクリート



(b) コンクリート履歴モデル (c) 付着応力 - すべり関係

図-3 材料モデル

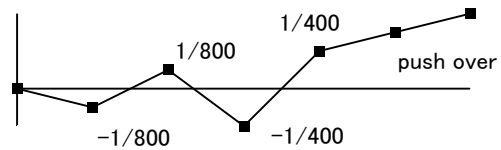


図-4 載荷サイクル

4. 構造実験の解析結果

構造実験を実施した A タイプと A'タイプ, B タイプの試験体について、解析結果を実験結果と比較して示す。

はじめに、図-5 では試験体の荷重-変形関係を比較する。試験体の最大耐力は全ての試験体において、およそ評価できた。しかし、A タイプの試験体では最大耐力に至るまでの剛性を過大評価し、その結果、最大耐力時の変形を過小評価した。図-6 は終局域における損傷状況(左側は実験、右側は解析により得られた最終ひび割れ状況)を比較したものである。A タイプでは柱及び壁板のせん断破壊、A'タイプでは柱のせん断破壊、柱と壁境界の損傷、B タイプでは柱と壁境界の損傷、柱のせん断破壊を確認できる。これより全ての解析による試験体の損傷パターンはおよそ再現できたことが分かる。

これ以降、枠柱の有無による比較を行うため、A タイプと B タイプに着目する。図-7 は解析により得られた両試験体の最大耐力時におけるせん断ひずみ度分布である。尚、同図の水平断面は危険断面上(壁・柱脚部)の結果を示し、立面断面は一点鎖線における切断面の結果を示す。A タイプでは壁端脚部でせん断ひずみ度が大きい。B タイプでは柱と壁境界で大きく枠柱では小さい。その結果、図-6 のように、破壊メカニズムに差が生じたと判断され、B タイプの枠柱がせん断ひび割れの貫通に対しては有意に働いたと考えられる。

ただし、A タイプの壁端部拘束域が機能していないわけではなく、図-8 の最大耐力時の鉛直方向引張ひずみ

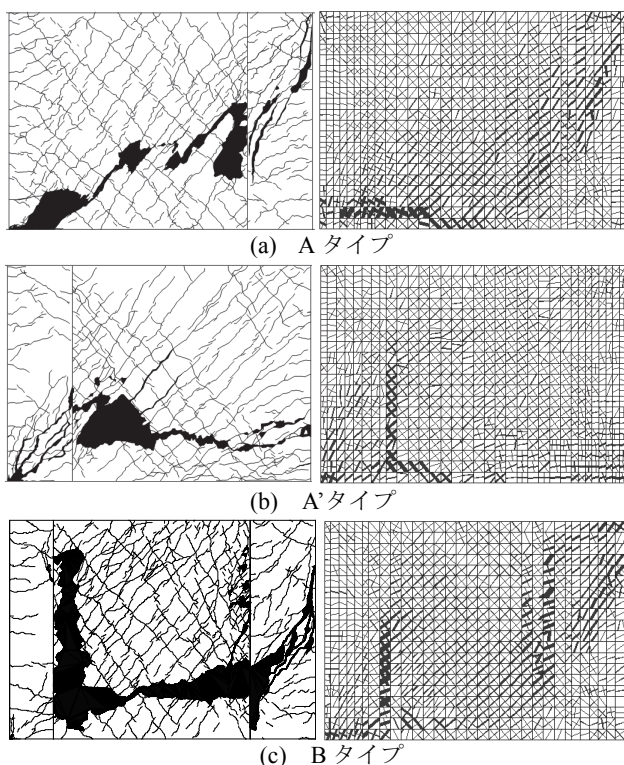


図-6 実験と解析の終局域損傷状況の比較

度分布に着目すると、A タイプでは壁端部拘束域、B タイプでは枠柱の壁側に引張ひずみ度が生じており、両者ともに平面保持が成立していないことが分かる。このことから、A タイプの拘束域も B タイプよりは小さいものの拘束効果を発現したと判断される。

図-9 は両試験体の最大耐力時の危険断面におけるせん断応力度の分布を示す。A タイプ、B タイプそれぞれ壁圧縮端から 0~150mm 付近、300~600mm 付近で負担が大きいことが分かる。但し、B タイプでは断面の変化があるため、図-10 のように壁長さ当たりのせん断力の負担として比較すると、B タイプが A タイプより、枠柱での負担が大きいことが分かる。A タイプは図-6, 7 に示したように壁圧縮端の損傷が大きくせん断力の負担が困難である。両タイプのせん断耐力は同程度であるものの、その水平力抵抗機構は異なっている。

5. パラメータ解析

5.1 パラメータ解析対象

以上の結果を踏まえて、パラメータ解析を行う。

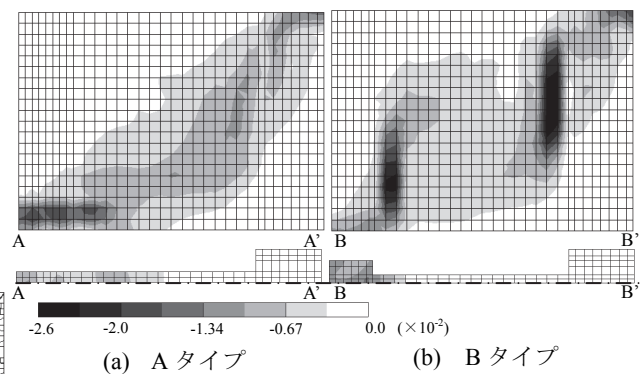


図-7 せん断ひずみ度分布の比較

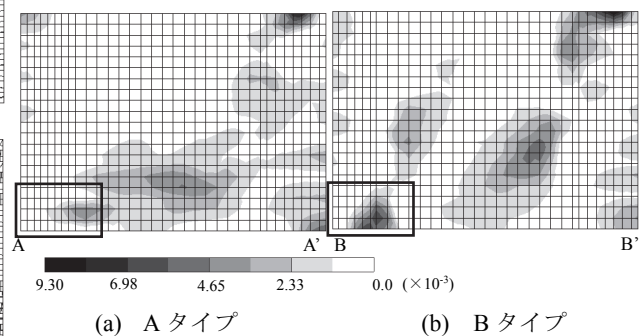


図-8 鉛直方向ひずみ度分布の比較

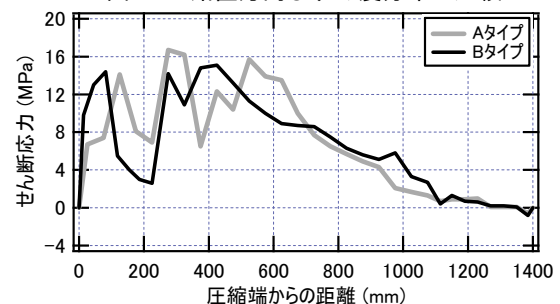


図-9 せん断応力度分布の比較

柱柱の大きさをパラメータとする解析の仮想試験体断面図を図-11, 12 に示す。図-11 の試験体は、両側に柱柱を持つ壁で、A タイプと B タイプの中間に当たるタイプを想定して、圧縮側端部にそれぞれ 125×125mm, 150×150mm, 175×175mm の柱柱を設けた。尚、これらの柱柱は RC 規準(1999)²⁾の推奨条件を満たさない。また、図-12 の試験体は一端の柱柱を省略した壁で、A, A' タイプを基準として、柱柱の大きさを 250×250mm, 200×200mm と変化させた試験体である。前者は A, A' タイプ同様、RC 規準(1999)²⁾の柱柱の推奨条件を満たす。試験体の設計方針は、文献 1) に従い以下の通りとした。

- ・試験体の断面積は同程度にする (1930±5cm²)
- ・柱の主筋量を等しくする (8-D10, 12-D16)
- ・壁筋量を等しくする
(縦筋: 2-D4@100, 横筋: 2-D4@35)

一方、既往のせん断耐力評価式での構造特性である、引張鉄筋比やせん断補強筋比をパラメータとする解析も計画した。構造実験を実施した A タイプと A' タイプを対象とし、引張鉄筋比を RC 規準²⁾に規定されている最小引張鉄筋比 0.8~1.6% の間で、壁板のせん断補強筋比を最小せん断補強筋比 0.25~1.05% の間でそれぞれ変化させて解析した。尚、モデル化方法、加力方法は 3 章に示す通りである。

5.2 柱柱の大きさをパラメータとした解析結果

(1) 両側柱付壁

図-13 に図-11 の各試験体の荷重-変形関係を比較して示す。柱柱の大きさが変化しても、ほぼ同等のせん断耐力、変形性能を有することが分かる。ただし、B タイプと比べるといずれもせん断耐力は増加している。これは、B タイプは最大耐力に至るまでに柱と壁境界での損傷が大きくなり、耐力壁が一体となってせん断抵抗しなかったためである。

図-14 に各試験体の最大耐力時のせん断ひずみ度の分布を示す。B タイプと最も断面形状に近い B175 に注目すると、B タイプと同様、柱と壁境界のひずみが大きい。しかし、その値は B タイプと比べると小さく、柱と壁境界の大きいひずみ域の鉛直方向への広がりも小さい。また、B150 では、ひずみが柱柱の両端で大きく、A タイプに最も断面形状に近い B125 では大きいひずみ域が柱柱を貫通している。A タイプに断面形状が近づく程、柱柱の損傷が大きくなる結果が得られた。補足として、最大耐力以降のせん断ひずみの分布(紙面の都合上、掲載は割愛した)は、全ての試験体で柱柱のひずみが増大し、B タイプのような柱と壁境界で損傷が集中することはなかった。表-3 に各試験体(B125, B150, B175)と A, B タイプの柱柱における最大軸力比及び τ/σ_c を示す。ここで、 τ/σ_c は柱柱の平均せん断応力度をコンクリー

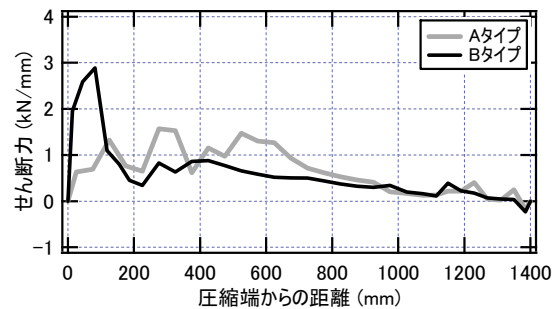


図-10 せん断力の負担分布の比較

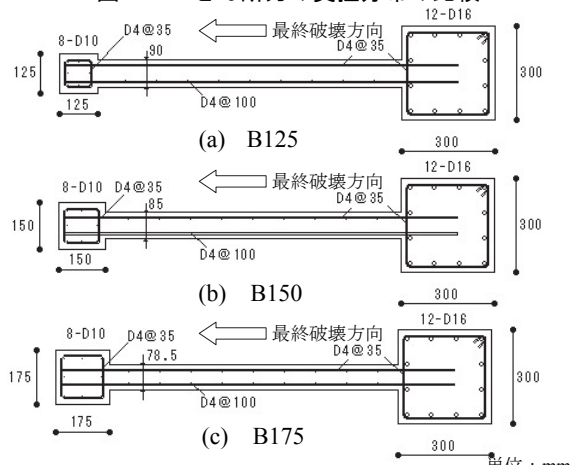


図-11 柱柱パラメータ試験体断面図(1)

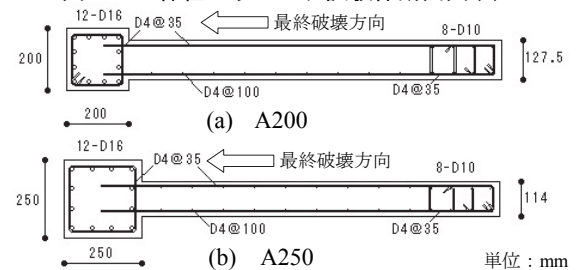


図-12 柱柱パラメータ試験体断面図(2)

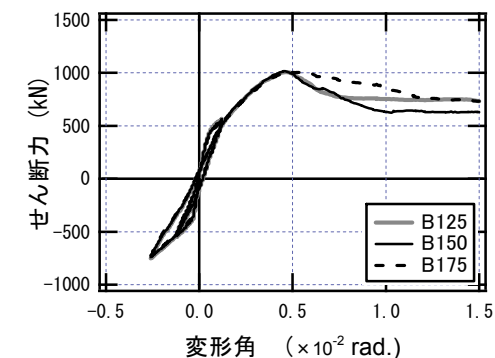


図-13 パラメータ解析による荷重-変形関係の比較(1)

表-3 柱柱の軸力比の比較

名称	柱柱寸法(mm)	軸力比	τ/σ_c
A タイプ	94×256	0.45	0.26
B タイプ	200×200	0.34	0.23
B175	175×175	0.47	0.37
B150	150×150	0.46	0.31
B125	125×125	0.50	0.35
A'タイプ	300×300	0.29	0.25
A250	250×250	0.39	0.28
A200	200×200	0.44	0.31

トの圧縮強度で除した値である。尚、Aタイプは枠柱を省略しているため、壁端部拘束域の結果を示す。軸力比に着目するとBタイプの負担が最も小さく、それ以外ではほぼ同等な値であった。また、せん断力比もBタイプが最も小さかった。枠柱が小さいB175~B125では、上記のように最終的に枠柱を貫通する損傷が生じた。十分な大きさの枠柱がない場合は、せん断耐力だけでなく終局の破壊形式も枠柱を省略したAタイプと同様になる結果が得られた。

(2) 枠柱省略壁(柱圧縮)

図-15に各試験体の荷重-変形関係を示す。枠柱が小さい程せん断耐力が低下する結果になった。図-16に最大耐力時のせん断ひずみ度分布の比較を示す。枠柱の大きいAタイプでは、他のタイプと比べて柱と壁境界の大きいひずみ域が鉛直方向に広く分布したが、最終的には枠柱を貫通するように大きいひずみ域を形成した。表-3にはこれらの試験体3体の軸力比と τ/σ_c も示した。Aタイプは軸力比、 τ/σ_c ともにBタイプと同程度であるが、両者は異なった破壊メカニズムを呈した。これより、

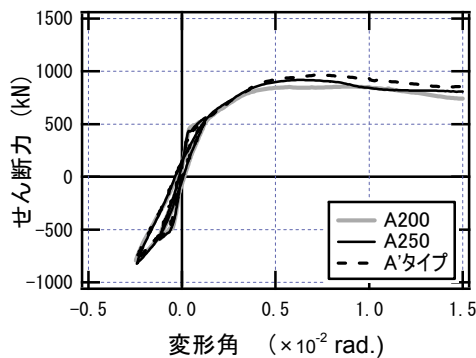


図-15 パラメータ解析による荷重 - 変形関係の比較(2)

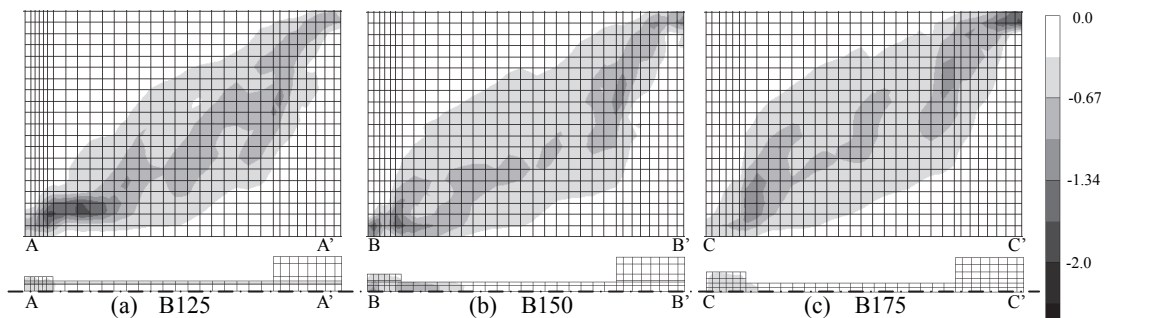


図-14 パラメータ解析によるせん断ひずみ度分布の比較(1)

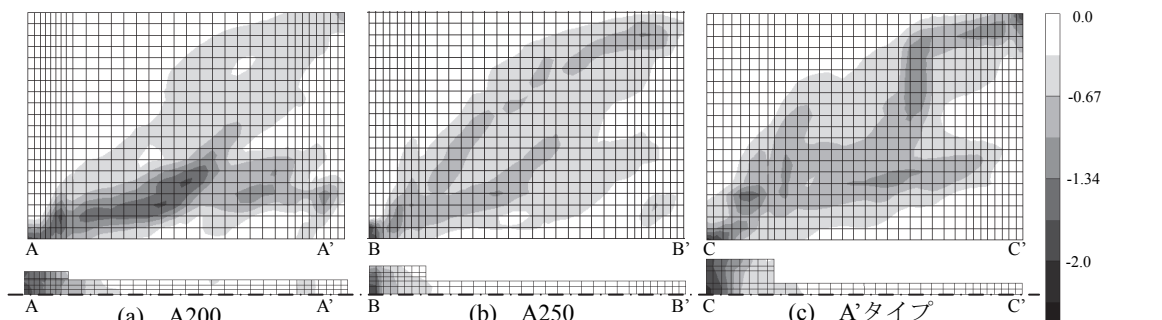


図-16 パラメータ解析によるせん断ひずみ度分布の比較(2)

ひずみ域の形成には枠柱の軸力、せん断力以外の要因も影響を与えているものと考えられる。また、先述の通りAタイプとA250はRC規準(1999)²⁾の枠柱の推奨条件を満たすため、これを満足する場合も枠柱を貫通するように損傷が進行する可能性があることを確認した。せん断ひずみの拡大方向を支配する要因を特定することが、終局の破壊形式を評価する方法に繋がると考えられるため、引き続き検討を要する。

5.3 既往のせん断強度式との対応

図-17では、枠柱省略壁について、既往のせん断耐力評価式中の引張鉄筋比と壁のせん断補強筋比をパラメータとする解析より得られたせん断耐力を、評価式による略算値と比較した。評価式は以下に示す文献¹⁾の提案式である。

$$Q_{WSU} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M/(Q \cdot L) + 0.12}} + 0.85 \beta \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh} + 0.1 \sigma_0} \right\} t_e \cdot i \quad (1)$$

t_e : 長さ l と断面が等しい長方形断面に置き換えた時の幅 (mm)。

ただし、 t_e は壁厚 t の1.5倍以下とする。

L : 部材の全長、 $d=0.9L$, $j=0.8L$ (mm)

p_{te} : 等価引張鉄筋比 (%) ($=100a_t / t_e \cdot d$)

a_t : 引張端から部材せいりの5分の1内の縦筋断面積 (mm²)

F_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

M/Q : せん断スパン長さ (mm)

ただし、1未満の場合は1, 3を超える場合は3とする。

σ_0 : 全断面積に対する平均軸方向応力度 (N/mm²)

$$\sigma_{wh} \cdot p_{wh} = \sum \sigma_w p_w \left(\frac{t_l}{A} \right) + \sum \sigma_s p_s \left(\frac{bD}{A} \right)$$

p_w : 壁横筋のせん断補強筋比 (小数)

p_s : 柱帯筋のせん断補強筋比 (小数)

σ_w, σ_s : 壁横筋および柱帯筋の降伏強度 (N/mm²)

A : 部材の断面積 (mm²), l : 壁長さ (mm)

β : 壁の配筋条件による低減係数

ダブル配筋もしくは両側に一辺 $2t$ 以上の柱がある場合 $\beta=1$

それ以外 $\beta=1/2$

壁圧縮となる場合の解析結果に注目すると、略算値は解析値の傾向を概ね捉えていることを確認できる。また、安全率は引張鉄筋比、せん断補強筋比をそれぞれパラメータとした場合に 1.21~1.30, 1.17~1.27 であり、良好な対応となった。一方、柱圧縮となる A'タイプの解析結果に注目すると、Aタイプと同様に計算値は解析値の傾向を概ね捉えているが、安全率はそれぞれ 1.46~1.51, 1.50~1.57 とやや過大評価する結果となった。

上記を除く今回解析を行った全試験体の解析値と略算値の比較を表-4 に示す。略算値は概ね良好にせん断耐力を評価できたことが分かる。しかし、一端の枠柱を省略した壁の柱圧縮の場合(A'タイプ, A250, A200)に注目すると、略算値は枠柱の大きさによらず、どの試験体もほぼ同じ耐力となる。しかし、解析結果では、枠柱の大小によってせん断耐力が増減した。その結果、最も枠柱の大きい A'タイプの安全率(解析値/略算値)が 1.5 を超えて過大評価する結果となった。

6.まとめ

筆者らによる既往の実験研究¹⁾で用いた、枠柱の有無をパラメータとする耐震壁について FEM 解析を実施した。その結果、試験体の耐力や、破壊状況をおよそ再現することができた。解析結果より、全断面が等しければ、枠柱の有無はせん断耐力に影響しないが、局所的なひずみ挙動や水平抵抗機構に影響することを確認した。

以上の結果を踏まえて、枠柱の大きさをパラメータとした解析を行った。両側柱付壁について、全断面が等しければ、枠柱の大小が変化してもせん断耐力は概ね等しかったが、枠柱の大小は局所的なひずみ挙動に影響した。十分な大きさのない枠柱は、枠柱を省略した耐震壁と同様な水平抵抗機構を呈した。一方、枠柱省略壁の柱圧縮側の載荷では、柱断面が大きいにも関わらず枠柱を貫通するように損傷が進行する場面があることを確認した。せん断ひずみの拡大方向を支配する要因を特定することが、終局の破壊形式を評価する方法に繋がると考えられるため、引き続き検討を要する。

また、各パラメータ解析結果と既往のせん断耐力評価式を比較した結果、評価式による略算値はすべて安全側にせん断耐力を評価した。しかし、一端の枠柱を省略した壁の柱圧縮側載荷の場合、略算値は解析値を過小評価する傾向が得られた。

謝辞

本研究は国土交通省の建築基準整備促進補助金事業の一環として行った。名古屋工業大学、矢作建設工業株式会社の関係者の皆様には、多大なるご協力をいただきました。厚くお礼申し上げます。

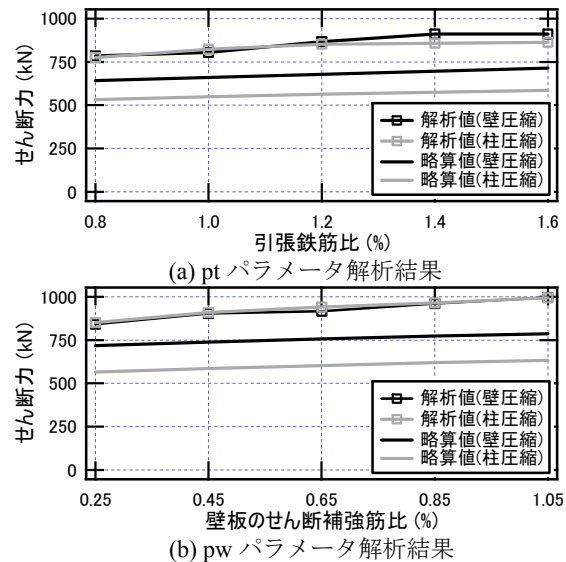


図-17 構造特性パラメータ解析と略算値の比較

表-4 各試験体解析値と略算値の比較

名称	解析値 (kN)	略算値 (kN)	解析値/略算値
Aタイプ	962	773	1.24
Bタイプ	923	625	1.48
B175	1007	687	1.47
B150	1016	735	1.38
B125	1008	771	1.31
A'タイプ	965	620	1.56
A250	920	621	1.48
A200	857	623	1.38

参考文献

- 1) 祖父江美枝, 高橋之, 真田靖士, 市ノ瀬敏勝: 鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力と破壊性状における枠柱の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.2, pp.427-432, 2010.6
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-, 1999.11
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V99 HELP
- 4) 長沼一洋: 三軸応力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, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 5) 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, pp.119-130, 1999.8
- 6) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 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, Vol.25, No.9, pp107-120, 1987.9
- 7) 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

Elmorsi, M., Kianoush, M.R. and Tso, W.K.: Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000