

論文 旧耐震基準で設計された RC 造ピロティ建物における柱の軸破壊順序の推定

伊豆川 瞬也*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*2

要旨：本研究の目標は、層崩壊の防止を目的とした経済性と安全性を同時に満たす耐震補強の提案であり、本研究では、その基礎段階として柱の軸破壊順序の推定を試みた。骨組解析結果から軸破壊順序には、初期軸力に加えて変動軸力の影響が大きいことを確認した。このことから、D 値法による変動軸力の算定と修正軸限界状態曲線による軸耐力の評価により軸破壊順序の推定を行った。その結果、仮想骨組モデルおよび実際の建物モデルにおいて最初に軸破壊する柱の推定が可能であることを確認した。

キーワード：耐震性能評価, RC 造骨組, 旧耐震基準, 耐震診断基準, 軸破壊, ファイバー解析

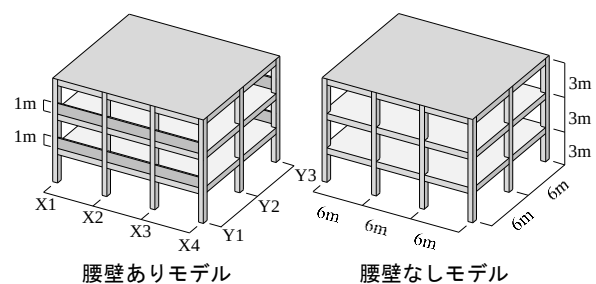
1. はじめに

近年の大地震では、1981 年以前の旧耐震基準（以下、旧基準）で設計された鉄筋コンクリート（以下、RC）造ピロティ建物における層崩壊の事例が報告されている。こうした背景から、旧基準建物の迅速な耐震補強が求められているが、費用等の問題から共同住宅等で耐震化が進んでいないのが現状である。既往の研究¹⁾より、建物の層崩壊は再分配軸力によって柱が連鎖的に軸破壊することが要因と考えられる。そのため、層崩壊の防止を目的とした経済性と安全性を同時に満たす耐震補強を行うには、最初に軸破壊する柱を適切に評価する必要があると考える。しかし、柱の残存軸耐力については不明瞭な部分が多く、耐震診断基準²⁾において柱がせん断破壊すると直ちに残存軸耐力を 0 とする安全側の評価がされている。また、一般的に第 2 種構造要素の判定の際には変動軸力を考慮していないため、柱の軸破壊順序を適切に評価できない恐れがある。本研究では、柱の軸耐力の評価に修正軸力限界状態曲線³⁾を用い、変動軸力を考慮した軸破壊順序の推定を試みる。

2. 旧基準 RC 造建物の軸破壊順序の推定

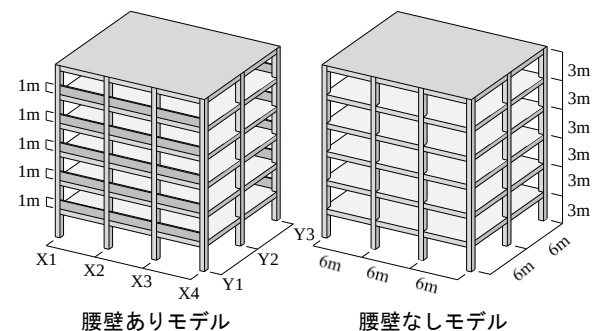
2.1 建物モデルの概要

図-1 に 3 層建物モデルの概要、図-2 に 6 層建物モデルの概要を示す。2 層以上に腰壁を設けて 1 層をピロティ層とした腰壁ありモデルと、ピロティ層を有さない腰壁なしモデルを 3 層および 6 層のそれぞれで作成した。材料強度は、3 層モデルでコンクリート強度を 18N/mm^2 、鉄筋の降伏強度を 240N/mm^2 とし、6 層モデルではコンクリート強度を 21N/mm^2 、鉄筋の降伏強度を 300N/mm^2 とした。断面情報は、1971 年以前の耐震規定を基に、鉄筋には丸鋼を用いて帯筋間隔を 300mm とした。スラブの厚さは 180mm とし、スラブ筋間隔は 200mm とした。



階	柱断面図	梁断面図
2,3F	B×D : 500×500 主筋 : 8-R25 帯筋 : R9-@300	B×D : 400×600 主筋 : 3-R25,3-R25 あばら筋 : R9-@300
1F	B×D : 500×500 主筋 : 12-R25 帯筋 : R9-@300	B×D : 400×600 主筋 : 4-R25,3-R25 あばら筋 : R9-@300

図-1 3層建物モデルの概要



階	柱断面図	梁断面図
2F~	B×D : 700×700 主筋 : 12-R25 帯筋 : R9-@300	B×D : 500×800 主筋 : 4-R25,3-R25 あばら筋 : R9-@300
1F	B×D : 700×700 主筋 : 16-R25 帯筋 : R9-@300	B×D : 500×800 主筋 : 5-R25,4-R25 あばら筋 : R9-@300

図-2 6層建物モデルの概要

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

2.2 解析モデルの概要

図-3 に解析モデルの概要を示す。解析には数値解析コード Opensees⁴⁾を用いた。柱はファイバー要素でモデル化し、梁は剛床仮定によるファイバー部材の強度上昇を低減するためにヒンジ部分のみファイバー要素を用いる BeamwithHinges 要素⁵⁾を用いた。なお、梁断面におけるスラブの協力幅は 0.6m とした。基礎および柱梁接合部は剛体要素とし、スラブは剛床仮定とした。腰壁付き柱は剛体要素とし、腰壁付き梁はファイバー要素における梁の断面情報に腰壁の断面を加えて表現した。コンクリートの材料構成則は、Kent-Park モデルを採用し、鉄筋は bi-linear 型とした。1 層の柱には、せん断破壊挙動を再現するためのせん断サブ要素⁶⁾を挿入した。なお、せん断破壊点のせん断力は、荒川 mean 式より算出し、その時のせん断変形は Elwood ら⁷⁾のせん断限界状態曲線を用いて求めた。1 層の柱脚に丸鋼主筋の抜け出し挙動を再現するための接合部サブ要素⁸⁾を挿入した。接合部サブ要素に付与する復元力特性は、曲げひび割れ点および降伏点により定義づけられる bi-linear 型でモデル化した。1 層の柱にせん断破壊後の軸力低下挙動を再現するための軸力パネを挿入した。軸力パネは、柱軸力と修正軸限界状態曲線の位置関係から軸破壊点の検出を行う。その後は、修正軸限界状態曲線上に乗るように水平変形に応じて軸力を低下させ、軸力低下に伴う軸圧縮変形を与えることで軸抵抗の喪失挙動を再現する。なお、柱の軸破壊挙動や再分配軸力を確実に評価するために奥行方向の対称性を考慮せず、全ての柱についてモデル化を行った。

図-4 に動的プッシュオーバー解析の概要を示す。解析方法は、層崩壊時の計算負荷による解析の安定性を考慮し、比較的緩やかな 1gal/0.01s の傾きで線形に増加する加速度を各階の質点に入力する動的プッシュオーバー解析とした。本手法では一定の外力分布を想定しているが、今後は地震応答解析での検証が必要であると考えている。

2.3 骨組全体の崩壊挙動

図-5 に各モデルのベースシア-1 層の層間変形角関係を示す。3 層および 6 層どちらも 1 層の柱がせん断破壊し、脆性的な挙動を示した。腰壁なしモデルと比較して、腰壁ありモデルの方が若干、初期剛性と最大耐力が上昇し、1 層の柱のせん断破壊が早まった。これは、腰壁によって外構面の柱にかかる変動軸力が増大したことが要因と考えられる。

図-6 に 6 層モデルの最大耐力時の変位図を示す。各層の変位に着目すると、腰壁なしモデルと比較して腰壁ありモデルでは、剛性の低い 1 層に変位が集中していることが確認できる。このような、変位の集中がピロティ層の柱のせん断破壊や軸破壊を招き、ピロティ建物が層崩壊しやすい 1 つの要因となっていると考える。

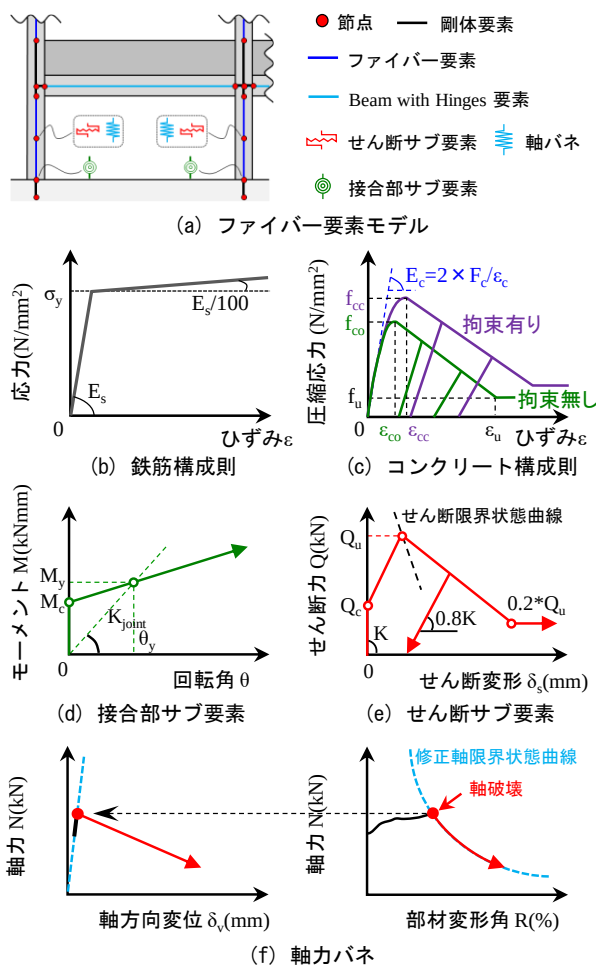


図-3 解析モデルの概要

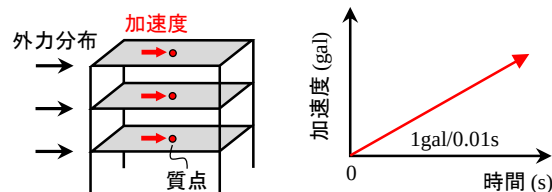


図-4 動的プッシュオーバー解析の概要

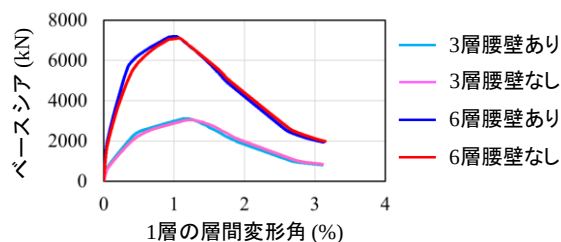


図-5 ベースシア-1 層の層間変形角関係

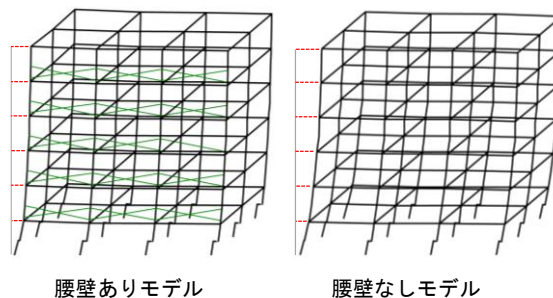


図-6 最大耐力時の変位図

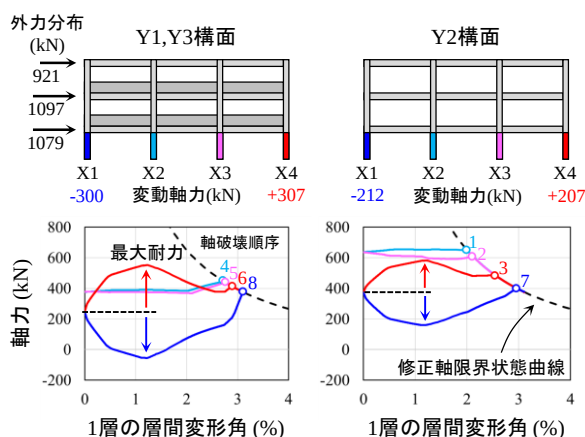


図-7 3層腰壁ありモデルの軸力図

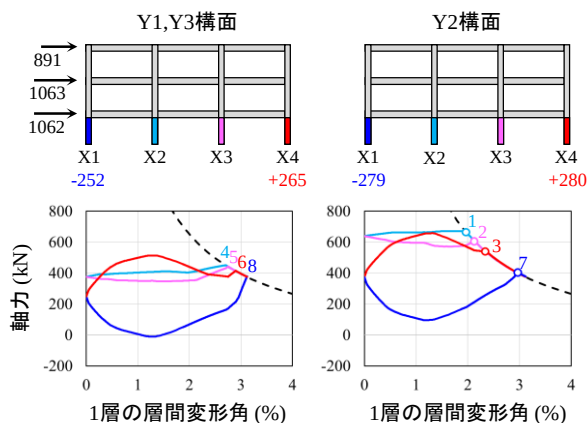


図-8 3層腰壁なしモデルの軸力図

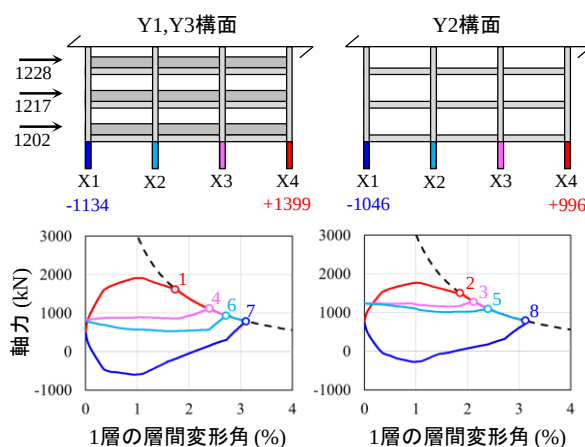


図-9 6層腰壁ありモデルの軸力図

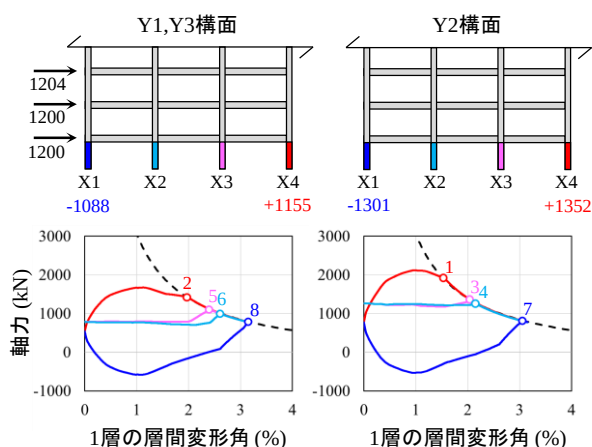


図-10 6層腰壁なしモデルの軸力図

2.4 変動軸力と軸破壊順序の解析結果

図-7 に3層腰壁ありモデルの軸力図を示す。変動軸力は腰壁によって剛性が高いY1,Y3構面の方が大きかった。軸破壊順序は初期軸力の大きいY2構面の中柱が最初に軸破壊し、次にY2構面で圧縮の変動軸力を受けていた柱が軸破壊した。図-8 に3層腰壁なしモデルの軸力図を示す。変動軸力は両側スラブ付きの梁を有するY2構面の方が大きかった。そのため、軸破壊順序は3層腰壁ありモデルと同様であったが、Y2構面のX4柱が早期に軸破壊に至った。図-9 に6層腰壁ありモデルの軸力図を示す。変動軸力は、両構面とも大きく、特に腰壁を有するY1,Y3構面の方が大きかった。その結果、軸破壊順序は、Y1,Y3構面で圧縮の変動軸力を受けていた柱、Y2構面で圧縮の変動軸力を受けていた柱の順に軸破壊し、その後は、X3, X2, X1構面の順で隣接する柱が連鎖的に軸破壊した。図-10 に6層腰壁なしモデルの軸力図を示す。変動軸力は両構面とも大きく、特にY2構面の方が大きかった。軸破壊順序は、Y2構面で圧縮の変動軸力を受けていた柱、Y1,Y3構面で圧縮の変動軸力を受けていた柱、初期軸力の大きいY2構面の中柱の順となった。以上のことから、軸破壊順序には初期軸力と変動軸力が大きく関わっていることが確認できた。

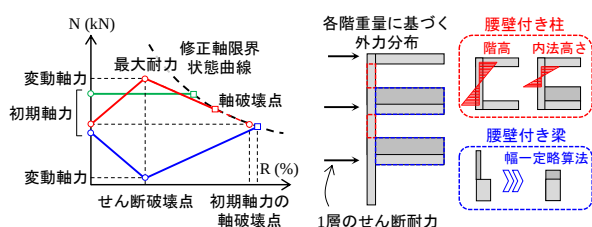


図-11 軸破壊順序の推定方法

図-12 変動軸力の算定方法

2.5 軸破壊順序の推定方法の構築

図-11 に軸破壊順序の推定方法を示す。変動軸力が小さい柱に対しては、初期軸力と修正軸限界状態曲線によって軸破壊点を算出する。変動軸力を受ける柱に対しては、剛比によって各部材の負担せん断力を求めることができるD値法によって算出した変動軸力の大きさとせん断限界状態曲線で算出した1層のせん断耐力時の変形角から最大耐力時の軸力を求めた。その後、最大耐力時の軸力と初期軸力による軸破壊点を結び、修正軸限界状態曲線との交点を軸破壊点とした。図-12 にD値法による変動軸力の算定方法を示す。外力分布は1層のせん断耐力と各階重量に基づいて決定した。剛比の算出には、腰壁付き柱は短柱化による剛性の上昇を考慮するため内法高さを用い、腰壁付き梁は幅一定略算法を用いた。

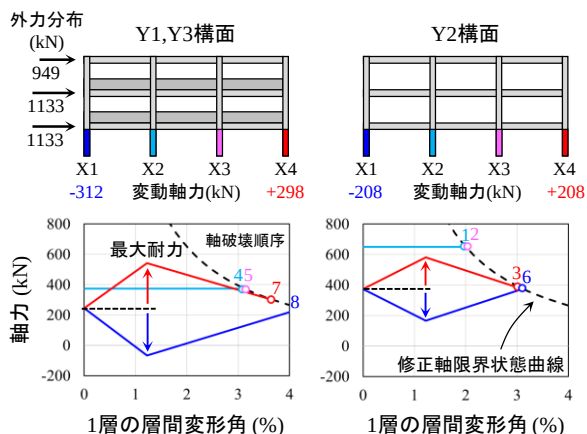


図-13 3層腰壁ありモデルの軸破壊順序の推定結果

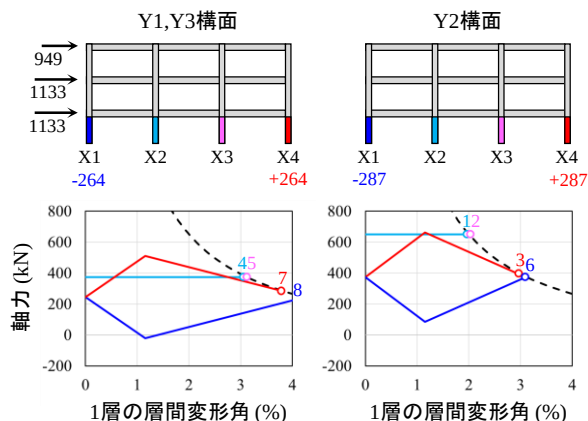


図-14 3層腰壁なしモデルの軸破壊順序の推定結果

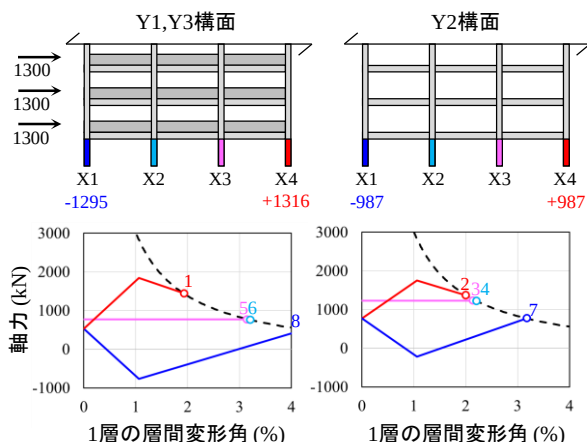


図-15 6層腰壁ありモデルの軸破壊順序の推定結果

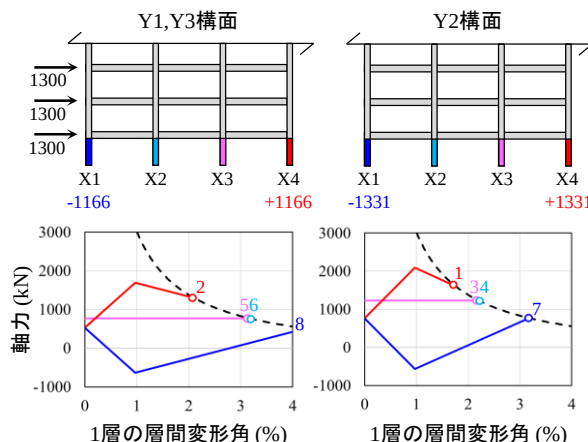


図-16 6層腰壁なしモデルの軸破壊順序の推定結果

2.6 変動軸力と軸破壊順序の推定結果

図-13 に 3 層腰壁ありモデルの軸破壊順序の推定結果を示す。変動軸力は解析結果と概ね対応していることが確認できる。軸破壊順序は、6 番目に軸破壊した柱が一致しなかった。これは、3 番目、5 番目に軸破壊した Y2 構面の X4 柱と Y1,Y3 構面の X3 柱から隣接する Y1,Y3 構面の X4 柱への再分配軸力を評価していないことが要因と考える。図-14 に 3 層腰壁なしモデルの推定結果を示す。こちらも変動軸力は概ね対応していたが、再分配軸力を評価していないため 6 番目に軸破壊した柱が一致しなかった。図-15 に 6 層腰壁ありモデルの推定結果を示す。変動軸力は、解析結果と比較して Y1,Y3 構面でやや小さい値となった。これは、解析モデルでは腰壁付き柱を剛体要素で表現しており、剛性を高く評価していることが要因と考える。軸破壊順序は再分配軸力の影響で 4 番目に軸破壊した柱が一致しなかった。図-16 に 6 層腰壁なしモデルの推定結果を示す。変動軸力は解析結果と概ね対応しており、軸破壊順序も完全に一致した。以上のことから、今回の解析ケースにおいて、最初に軸破壊する柱については、構築した軸破壊順序の推定方法を用いて推定できることを確認した。

図-17 に再分配軸力を考慮した 3 層腰壁なしモデル

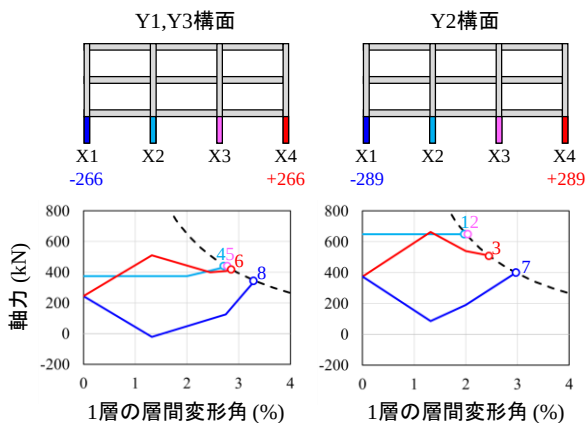


図-17 3層腰壁なしモデルの軸破壊順序の推定結果
(再分配軸力を考慮)

の軸破壊順序の推定結果を示す。再分配軸力を考慮することで解析結果と完全に一致することが確認できた。なお、再分配軸力は、柱が軸破壊する度に、その柱が負担できなくなった分の軸力を隣接する軸破壊していない柱に再分配した。また、今回のモデルでは全ての梁の曲げ剛性とスパンが同じであるため、既往の研究⁹⁾を参考にし、軸力は均等に再分配した。計算は煩雑になるが、軸破壊順序を高い精度で推定するためには、このように再分配軸力を考慮する必要があると考える。

3. 実際の建物における軸破壊順序の推定

3.1 建物モデルの概要

図-18 に検討対象の建物モデルの概要を示す。この建物は、2016 年の熊本地震で 1 層が層崩壊に至った実際の旧基準建物である。1 層が店舗で 2～5 層が共同住宅となっており、1 層の壁量が少ないことから、この建物はピロティ建物といえる。材料強度は 1971 年以降の耐震規定を基に決定し、コンクリート強度を 21N/mm^2 、鉄筋の降伏強度を 295N/mm^2 とした。断面情報は、熊本地震の被害調査⁹⁾に基づいて決定した。また、実際の建物を基に作成したモデル 1 に加えて、そこから 1 層の載荷方向に直交な耐震壁（以下、直交耐震壁）を取り除いたモデル 2 を作成することで、軸破壊順序における直交耐震壁の影響について検証を行った。解析の概要は 2 章と同様とした。図-19 に耐震壁のモデル化の概要¹¹⁾を示す。柱と壁は別々に軸支持能力を評価した。せん断力はせん断サブ要素で表現し、用いる復元力特性のせん断ひび割れ強度、せん断終局強度は耐震診断基準式²⁾を用いて算出し、せん断終局後の剛性は初期剛性の $1/1000$ とした。

3.2 骨組全体の解析結果

図-20 にモデル 1 およびモデル 2 のベースシア-1 層の層間変形角関係を示す。モデル 1 およびモデル 2 どちらも 1 層の柱がせん断破壊し、層崩壊に至った。最大耐力に着目すると、モデル 1 と比較して直交耐震壁を削除したモデル 2 の方が大きいことが確認できる。これは、直交耐震壁が存在しないことで、1 層の柱軸力が上昇し、せん断耐力も上昇したことが要因と考えられる。また、モデル 2 の方が早期に層崩壊に至ったのは、1 層の耐震壁の軸支持能力が存在しないことが要因と考えられる。

3.3 モデル 1 の軸破壊順序の検証

図-21 にモデル 1 の軸破壊順序の推定結果を示す。袖壁付き柱は、引張側の壁を除いた断面積を幅一定略算法によって置換し、剛比を求めた。変動軸力は壁量が多い廊下側で大きく受けていたが、柱の軸力比が高く、せん断破壊が早期に発生したため、変動軸力の影響をあまり受けずに概ね初期軸力の順となった。

図-22 にモデル 1 の軸破壊順序の解析結果を示す。推定結果と同様に廊下側で大きな変動軸力を受けていたが、引張側の変動軸力が一致しなかった。これは、1 層の直交耐震壁の縦筋が引張軸力を負担したことで、柱にかかる引張の変動軸力を抑制したことが要因であると考えられる。

図-23 に偏心による軸力を示す。廊下側に剛心が寄ることで、建物にねじれ挙動が発生し各柱に軸力がかかることが確認できる。これがベランダ側 X1 柱で圧縮の変動軸力を受けていた要因であると考えられる。軸破壊順序はベランダ側の 4 番目と 5 番目が前後したが概ね推定結果と一致した。

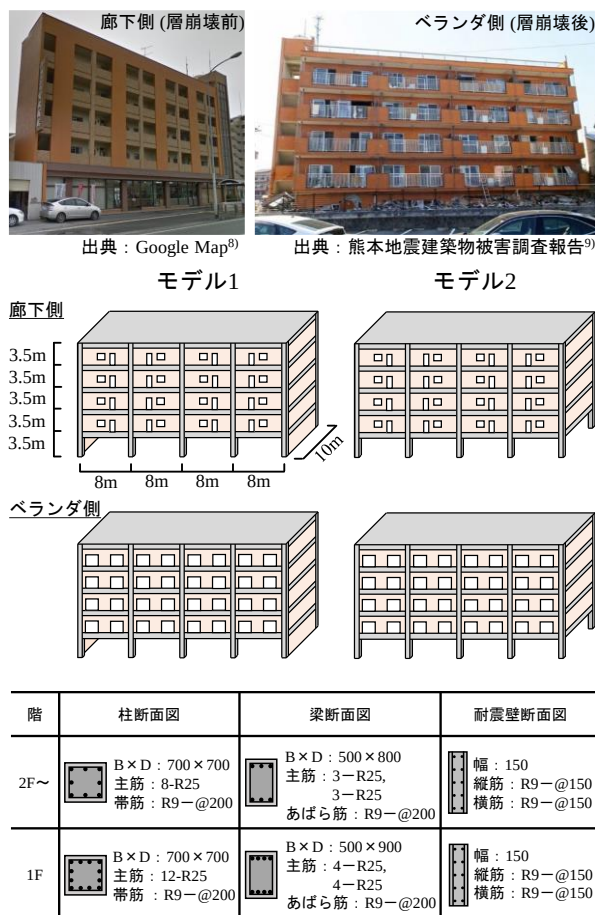


図-18 建物モデルの概要

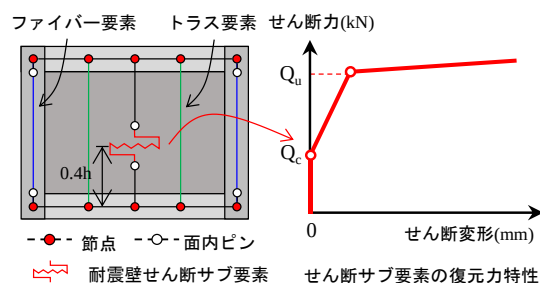


図-19 耐震壁のモデル化¹¹⁾

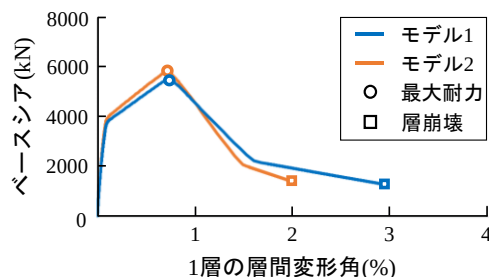


図-20 ベースシア-1 層の層間変形角関係

3.4 モデル 2 の軸破壊順序の検証

図-24 にモデル 2 の軸破壊順序の推定結果を示す。1 層の耐震壁が存在しないことで、モデル 1 と比較して各柱の初期軸力が上昇していた。D 値法は構面別に計算を行うため、直交耐震壁の有無に関わらず変動軸力の大きさと軸破壊順序はモデル 1 と変わらなかった。

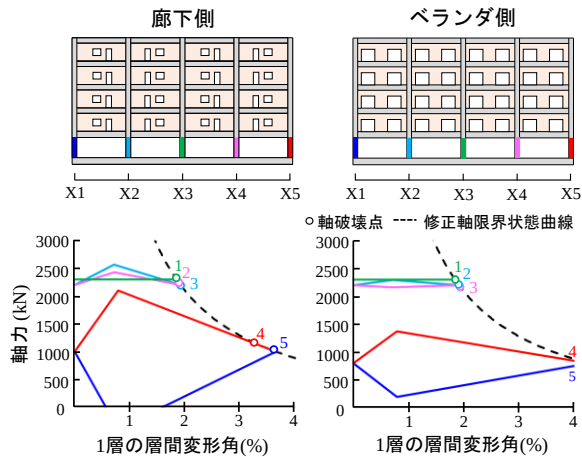


図-21 モデル1の軸破壊順序の推定結果

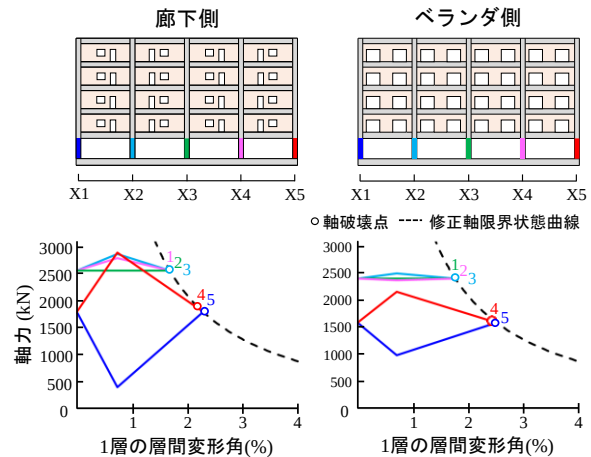


図-24 モデル2の軸破壊順序の推定結果

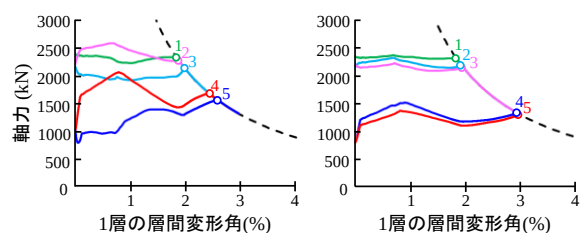


図-22 モデル1の軸破壊順序の解析結果

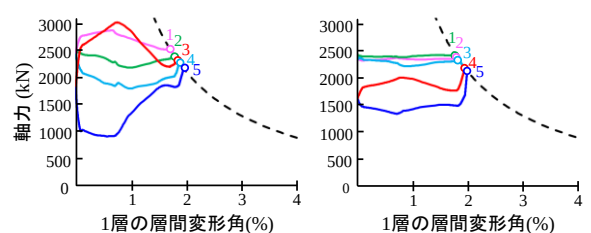


図-25 モデル2の軸破壊順序の解析結果

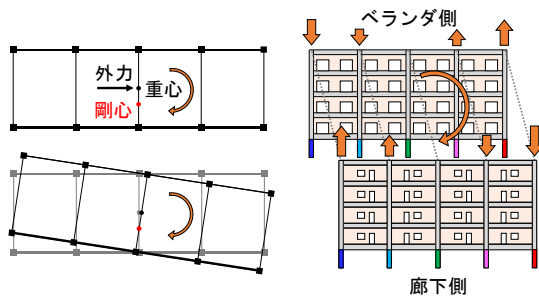


図-23 偏心による軸力

図-25にモデル2の軸破壊順序の解析結果を示す。モデル1の解析結果と比較して直交耐震壁が存在しないため隅柱が大きな変動軸力を負担していることが確認できる。また、解析結果と比較して、推定結果の廊下側の引張の変動軸力が大きくなった。これは、片側袖壁付き柱について、耐震診断基準を参考に袖壁長さの半分を考慮して剛比の計算を行った結果、剛性を高く評価してしまったことが要因と考えられる。その他の柱の変動軸力は偏心の影響を考慮できていないが概ね推定結果と一致した。軸破壊順序は、再分配軸力の影響で廊下側の3番目と4番目が前後したが概ね推定結果と一致した。

4. まとめ

- (1) 提案した軸破壊順序の推定方法を用いて、最初に軸破壊する柱を推定できることを確認した。また、再分配軸力を考慮することで、より高い精度で軸破壊順序を推定できることを確認した。
- (2) 直交耐震壁や偏心を有する建物において、D値法による変動軸力の算定は十分ではないが、軸破壊順序は概ね推定できることを確認した。

参考文献

- 1) 伊豆川瞬也, 他: 旧耐震基準で設計された RC 造ビロティ建物の崩壊過程における柱軸力の再分配挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.175-180, 2023
- 2) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2017
- 3) 蓮池 類, 他: Shear-Friction モデルの釣り合い方程式に基づく RC 造柱の軸限界状態曲線の修正式, コンクリート工学年次論文集, pp.133-138, 2019.6
- 4) Open System for Earthquake Engineering Simulation, <http://opensees.berkeley.edu> (閲覧日: 2023年9月1日)
- 5) 劉奕歆, 塩原等: Overstrength Effect of Axial Constraint to Fiber Section Beam Column Element, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.289-290, 2011.8
- 6) 田嶋和樹, 他: 脆性部材の破壊が RC 造骨組の耐震性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.337-342, 2012
- 7) Elwood K. J. and Moehle J. P.: Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, PEER-2003/01, 2003.11
- 8) Google 社: <https://www.google.com/maps> (閲覧日: 2023年12月10日)
- 9) 日本建築学会: 2016年熊本地震災害調査報告, 2018
- 10) 国土交通省: 熊本地震建築物被害調査報告, 2016
- 11) 山根康孝, 他: 地震動を受ける鉄骨ブレース補強後 RC 造建物の耐震性能評価: (その2) RC 造耐震壁の弾塑性マクロ解析モデルの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.35-36, 2014