

地震被害を受けた RC 造中低層建物の接合部降伏破壊に関する考察

正会員 ○井上諒*¹ 村野竜也*² 佐野由宇*³
同 晉沂雄*⁴ 北山和宏*⁵

鉄筋コンクリート造 変動軸力 二軸相関
柱梁接合部 接合部降伏破壊

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 造建物の耐震設計では、柱梁接合部のせん断耐力が入力せん断力を上回るよう規定される¹⁾。しかし、楠原・塩原は図1のような柱梁接合部の曲げ抵抗による破壊機構^{2),3)}を提唱し、十分な接合部せん断余裕度を確保しても、柱梁曲げ耐力比 (柱と梁の曲げ終局モーメントの比) が1に近い場合は接合部降伏破壊が生じ、梁曲げ終局耐力が十分に発揮できないことを明確にした⁴⁾。

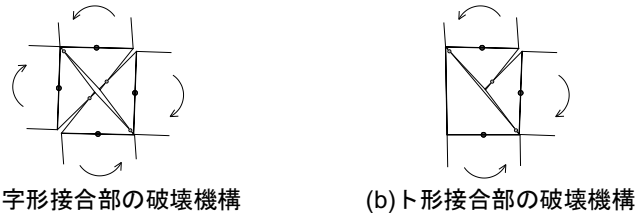
特にト形柱梁接合部では地震時に引張変動軸力が生じ、柱の曲げ終局モーメントが低下するので、柱梁曲げ耐力比が1に近づくと予想される。実際に2016年の熊本地震では中低層RC建物G^{5),6)}の側柱梁接合部の降伏破壊に伴い、柱の圧縮軸力が保持できず軸崩壊に至った被害が報告された(写真1)。従って、今後のRC建物は地震時の変動軸力等により降伏破壊する柱梁接合部の軸崩壊により、崩壊に至る可能性が十分に考えられる。そこで、石川らによって立体隅柱梁部分架構を用いた接合部降伏破壊機構の実験研究⁷⁾が行われた。同研究では引張軸力を考慮した変動軸力と二方向水平力を導入し、引張軸力や柱主筋比・柱主筋径・柱中段筋等が柱梁接合部の降伏破壊とその後の軸崩壊に及ぼす影響を検討した。その結果、引張軸力比(全柱主筋の降伏力に対する引張軸力の比)が-0.2程度の引張変動軸力が接合部降伏破壊と軸崩壊へ及ぼす影響は小さいこと、柱主筋比と柱主筋径の増大が接合部降伏破壊及びその後の軸崩壊の抑制に寄与したこと、層せん断力の二軸相関を検討することで接合部降伏破壊発生が把握可能であること等を指摘した。

しかし、既往研究は立体隅柱梁接合部を対象としており、2016年熊本地震の被害建物のような(三本の梁が貫入する)立体側柱梁接合部で生じた降伏破壊について、層せん断力の二軸相関の観点から検討した研究事例は殆ど見当たらない。そこで本研究では、実被害を受けた建物において降伏破壊が生じた柱梁接合部に着目し、層せん断力の二軸相関を中心とした構造性能及び破壊メカニズムについて検討・考察する。

2. 熊本地震による実被害建物に関する検討

2.1 建物概要

建物Gの伏図を図2、接合部破壊した4階柱梁接合部の配筋図を図3に示す^{5),6)}。同建物は1965年竣工、旧耐震基準で設計された5階建てRC造建物で、梁スパン8.91mの2×2ス



(a)十字形接合部の破壊機構 (b)ト形接合部の破壊機構
図1 柱梁接合部の降伏破壊機構

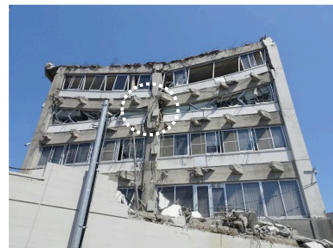


写真1 被害建物G⁶⁾

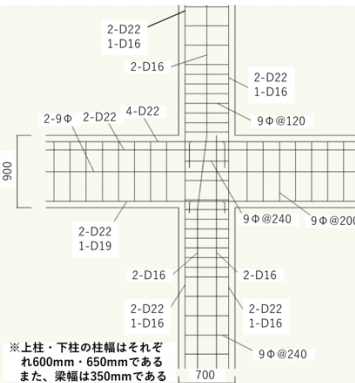


図3 4階柱梁接合部の配筋図⁶⁾

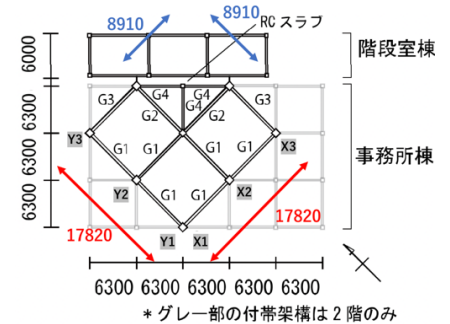


図2 建物Gの伏図 (単位: mm)

表1 建物Gの各種材料強度

階	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	主筋降伏点 (N/mm ²)	あばら筋降伏点 (N/mm ²)
5	27.8	344	294
4	37.5	399	
3	24.6	344	
2	28.4		
1	22.1		

パンのラーメン構造である。また、事務所棟と階段室棟 (コア棟) で構成されており、二棟を接続するRCスラブが大破し、コア棟に目立った損傷がなかったことから、本検討では事務所棟を独立した建物として検討を進める。

2003年に実施された耐震二次診断で耐震補強が必要とされたが、耐震補強は未実施であった。損傷は4階以上に集中し、特に4階側柱の柱頭・柱脚に接続する柱梁接合部が大破し、建物が部分崩壊した(写真1)。本研究では最も被害の大きかったX1-Y2の柱梁接合部を主な検討対象とする。

2.2 部材耐力計算における軸力及び材料強度

部材の耐力計算に必要な材料強度を表1に示す⁶⁾。コンクリートの圧縮強度は、被害の最も大きかった4階は地震被害調査時の値、他の階については耐震診断時の値である。主筋の降伏強度も4階は地震被害調査時の値であるが、他の階については文献⁸⁾を参考に定めた。同様にあばら筋も文献⁸⁾を参考に定め、スラブ筋の降伏強度はあばら筋と同値を使用した。

柱の負担軸力は文献⁶⁾の建物重量を基に算出した。柱及び梁のせん断余裕度が1を上回ることから、平面保持を仮定した断面解析により求めた曲げ終局耐力を各部材の終局耐力とし、崩壊メカニズム時の梁せん断力を変動軸力とした。スラブの取り付く梁は、両側もしくは片側1mまでの範囲を協力幅とし、協力幅内のスラブ筋を梁曲げ終局耐力の計算に考慮した。

2.3 層せん断力の二軸相関

図4に被害の最も大きかった4階と、上下の3階と5階の層せん断力の二軸相関を示す。接合部せん断終局耐力は文献⁷⁾、柱及び梁の曲げ終局耐力は断面解析により、接合部曲げ終局耐力は文献^{2),3)}より算出した。各部材断面は文献⁶⁾によるが、切り欠きのあるX1-Y1とX1-Y3の柱断面は正方形に置換し、コンクリートのかぶり厚は40mmとした。ト形方向の梁主筋の接合部内定着長さは柱せいの0.75倍とした。梁曲げ終局耐力線は矩形とし青線、接合部曲げ終局耐力線は楕円補完して赤線で示す。一方向水平力作用時の破壊モードは梁曲げ終局になる一方で、二方向水平力作用時は接合部曲げ終局で耐力が決定されることがわかる。

図5に柱梁曲げ耐力比及び文献⁹⁾で定義される強度低下率 β_j （梁曲げ終局耐力に対する接合部曲げ終局耐力の比）を示す。 β_j の算出は図4の二軸相関を用い、一方向水平力作用時は原点から各軸一赤線交点の距離を原点から各軸一青線交点の距離で除した値、二方向水平力作用時は原点から黄線一赤線交点の距離を黄線一青線交点の距離で除した値とした。同文献⁹⁾では β_j が1を下回ると接合部降伏破壊が生じ、設計者の意図した保有水平耐力が β_j 分低下するとされている。全柱梁接合部で一方向水平力作用時の β_j は1.06~1.35と1を上回ったが、二方向水平力作用時の β_j は0.78~0.97と1を下回る結果となり、 β_j は5階・4階・3階順に大きかった。なお、同一接合部でも方向別の柱梁曲げ耐力比の計算結果が異なるが、これは変動軸力の影響による軸力の差や梁の上下配筋の差（上端2段配筋・下端1段配筋）によるものである。4階と5階の柱梁曲げ耐力比は、一方向水平力作用時で約1.4~3.2、二方向水平力作用時で約1.1~1.3の範囲であった。一方、3階の柱梁曲げ耐力比は、一方向水平力作用時で1.63~3.23、二方向水平力作用時で1.41~1.45と、他階の柱梁曲げ耐力比の最小値（1.06~1.10）に比べ大きい値を示した。各階への入力地震力の詳細把握はできていないが、3階では柱梁曲げ耐力比が比較的大きいため、接合部破壊が生じなかった可能性がある。

今回検討した全接合部において、 β_j が一方向水平力作用時は1

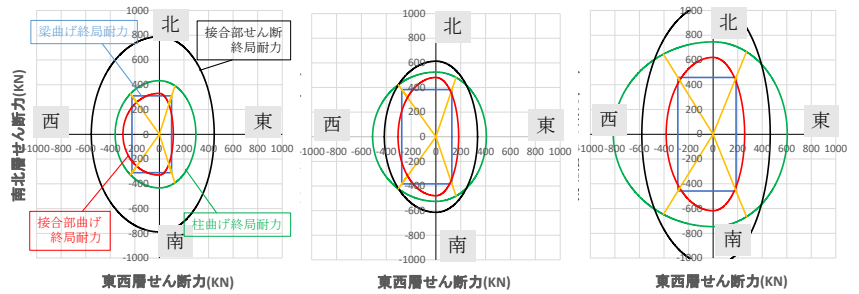


図4 側柱梁接合部 (X1-Y2) の層せん断力の二軸相関

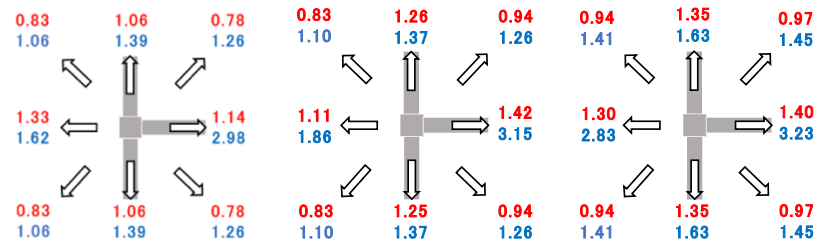


図5 方向別の強度低下率 (赤文字)・柱梁曲げ耐力比 (青文字)

を上回り、二方向水平力作用時は1を下回ったことから、主に二方向からの水平力によって接合部降伏破壊が発生したと判断される。5階も接合部損傷が大きかったが、4階の方で先に接合部降伏破壊へ至ったと考えられる。なお、文献⁹⁾で実施された静的増分解析結果によると、各限界状態における層間変形角の分布から全方向で4階の層間変形角が最も大きく、従って4階での接合部破壊が最も顕著であったと考えられる。しかし、二軸相関を用いた本検討では、強度低下率 β_j が一番小さい5階が先に接合部降伏破壊すると予想されるため、三方向地震応答解析等による詳細な検討が必要である。

3. まとめ

本研究で得た知見を下記にまとめる。

- (1) 本研究で検討した柱梁接合部では、層せん断力の二軸相関により、接合部降伏破壊は一方向水平力よりも二方向水平力の作用により生じた可能性が高いと判断された。
- (2) 水平二方向載荷時の強度低下率が1を下回った場合においても、柱梁曲げ耐力比が1.4以上の側柱梁接合部では接合部降伏破壊に至らない事例が見られた。

【参考文献】

- 1) 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，1999
- 2) 楠原文雄，塩原等：鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の終局モーメント算定法，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.657，pp.2027-2035，2010.11
- 3) 楠原文雄，塩原等：鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の終局モーメント算定法，日本建築学会構造系論文集，Vol.78，No.693，pp.1949-1958，2013.11
- 4) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：終局強度と部材端力の相互作用，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.635，pp.121-128，2009.1
- 5) 斎藤真也，向井智久，塩原等：2016年熊本地震により被災した鉄筋コンクリート造庁舎の柱梁接合部に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1039-1044，2018.7
- 6) 建築研究所：建築研究資料，No.204，『熊本地震で被災した鉄筋コンクリート造建築物を対象とした地震後継続使用確保に関する検討』，第9章「建築物Gに関する調査分析」，2021.10
- 7) 石川巧真，村野竜也，佐野由宇，晋 新雄，北山和宏：三方向地震力を受けて降伏破壊した鉄筋コンクリート隅柱梁接合部の軸崩壊に関する研究（その1~4），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.371-378，2021.9
- 8) 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
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説，2021

*1 東京都立大学大学院都市環境科学研究科建築学域 大学院生
 *2 明治大学大学院理工学研究科建築・都市学専攻 大学院生
 *3 石本建築事務所（元明治大学大学院生） 修士（工学）
 *4 明治大学大学院理工学研究科建築・都市学専攻 准教授 博士（工学）
 *5 東京都立大学大学院都市環境科学研究科建築学域 教授 工博

*1 Graduate Student, Tokyo Metropolitan University
 *2 Graduate Student, Meiji University
 *3 Ishimoto Architectural & Engineering Firm, M. Eng.
 *4 Associate Professor, Meiji University, Dr. Eng.
 *5 Professor, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.