

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3：柱梁接合部の降伏破壊および軸崩壊に向かう挙動

正会員 ○佐野由宇*3 石川巧真*2 村野竜也*3
同 北山和宏*1 晉沂雄*4

鉄筋コンクリート 隅柱梁接合部 三方向地震力
接合部降伏破壊 軸崩壊 柱主筋座屈

1. はじめに

その2に引き続き、本報では層せん断力の二軸相関や層間変形を構成する柱、梁及び接合部の変形成分の割合に基づき接合部降伏破壊の発生について考察し、柱中段筋の軸ひずみの推移より、その後の軸崩壊に向かう挙動について検討する。

2. 層せん断力の二軸相関

図1に層せん断力の二軸相関、図2に柱頭の載荷経路を示す。図1は東西及び南北方向の層間変形角 $R=0.5\%$ (接合部主対角ひび割れ発生前)、 1.0% (接合部主対角ひび割れ発生時)、 1.5% (最大耐力到達時) 及び 2.0% (最大耐力到達後) の第1サイクルで層せん断力が描く軌跡を表す。図中にその1で紹介した梁曲げ終局耐力、接合部曲げ終局耐力¹⁾及び接合部せん断終局耐力²⁾の計算値もあわせて示す。梁曲げ終局耐力線は矩形、接合部せん断終局耐力線は楕円とした。接合部曲げ終局耐力線は1方向水平載荷時の耐力計算値を楕円で補完し、軸力が変化する地点ではその落差を直線で繋いだ。横軸及び縦軸はそれぞれ図2の東西軸及び南北軸に一致するため、層せん断力の描く軌跡は柱頭の載荷経路と同様に推移する。

全試験体で層せん断力の描く軌跡が接合部せん断終局耐力線よりも大きく内側に位置したため、接合部のせん断破壊は生じなかったと判断した。 $R=0.5\%$ (点線) ではいずれの試験体も接合部の損傷が軽微であったため、変形保持方向の耐力はほとんど低下せず、層せん断力の描く軌跡が矩形となった。一方、 $R=1.0\%$ (太破線) では各種鉄筋が随所で降伏し、層せん断力の描く軌跡はわずかに曲線状となった。この時、いずれの試験体も南面及び西面の柱梁接合部に複数の斜めひび割れが発生した。試験体T2に対して柱主筋比の小さい試験体T1及びT3では、同1.0%の南東地点Dで層せん断力の描く軌跡が接合部曲げ終局耐力線にほぼ達した。 $R=1.5\%$ (太実線) ではいずれの試験体も最大耐力を迎え、南西地点B及び南東地点Dで層せん断力の描く軌跡が梁曲げ終局耐力線及び接合部曲げ終局耐力線に到達もしくはほぼ到達した。同1.5%の引

張軸力側の北東地点Fでは、全試験体の層せん断力の描く軌跡が接合部曲げ終局耐力線よりも内側に位置した。圧縮軸力側に比べ、引張軸力側では接合部の損傷によって水平耐力が低下したため、接合部曲げ終局耐力計算値が実験値を過大評価した。最大耐力以降の $R=2.0\%$ (細実線) では、全試験体で接合部損傷進展に伴い水平耐力が低下した。柱主筋径の小さい試験体T3では水平耐力の低下が試験体T1及びT2に比べて顕著であった。柱中段筋本数の増量及び柱主筋の太径化は、最大耐力後の水平耐力低下の抑制に寄与した。

立体隅柱梁接合部における2方向水平載荷時の接合部曲げ終局耐力は、文献¹⁾で提案された1方向水平載荷時の接合部曲げ終局耐力計算値を楕円補完することで、軸力比 $0.04\sim 0.13$ の範囲では妥当に評価できた。一方、引張から長期圧縮の軸力比 $-0.20\sim 0.04$ の範囲では計算値が実験値を7~14%上回り、実験結果を過大評価した。上柱軸力比を $0\sim 0.13$ と変動させた既往研究³⁾でも軸力比0の地点では同様の結果となったため、引張軸力及び低圧縮軸力を受ける場合の接合部曲げ終局耐力の評価法については、今後検討が必要である。

3. 層間変形を構成する柱、梁及び柱梁接合部の変形成分

図3に試験体T2を代表例として層間変形角に占める柱、梁と柱梁接合部の変形成分を積み上げグラフで示す。2方向水平加力状態 (高圧縮軸力側の地点B、引張軸力側の地点F) での南及び北方向の変形成分を表わす。ここで柱と梁の変形成分は各部材のたわみと危険断面位置での曲げひび割れの開口による回転変形の成分を含む。柱梁接合部の変形成分は文献⁴⁾の曲げ変形機構に基づき測定した実験値から算出した。

高圧縮軸力側の地点Bでは、最大耐力 ($R=1.5\%$) 以降に梁の変形成分は増加せず、柱梁接合部の変形成分が急増して $R=2.0\%$ では接合部変形が全体変形に占める割合が44%となった。最大耐力後に柱梁接合部の変形成分が支配的となったことから、最大耐力時に接合部降伏破壊が生じたと判断される。この傾向は他の試験体でもほぼ同様であった。

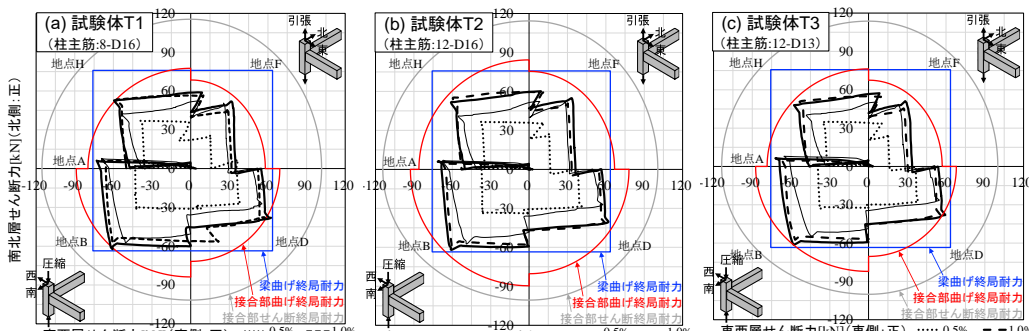


図1 層せん断力の二軸相関

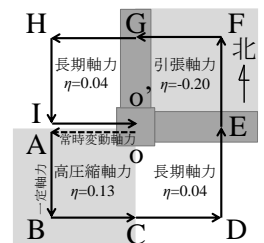


図2 柱頭の載荷経路 (第1サイクル)

一方、引張軸力側の地点 F では、最大耐力到達前から柱梁接合部の変形成分が増大し、 $R=1.0\% \sim 1.5\%$ で全体変形に占める割合は $40\% \sim 56\%$ であった。引張軸力により柱梁接合部への鉛直方向の拘束が緩和されたため、早期に接合部の変形成分が増大した。他試験体の引張軸力側でも、接合部降伏破壊発生前から柱梁接合部の変形が支配的であり、引張軸力が柱梁接合部の変形に大きく影響を与えた。

4. 柱中段筋の軸ひずみの推移

接合部降伏破壊後に軸崩壊に向う挙動を検討するに当たり、柱中段筋の軸ひずみの推移を考える。柱中段筋の接合部高さ中央部では、水平力による曲げ応力の影響が少ないと判断し、そのひずみの推移を調べた。図 4 に圧縮側を負値とした柱中段筋のひずみの推移と柱中段筋のひずみゲージの貼付位置について、試験体 T1 と T2 を代表例として示す。横軸は実験開始から終了時までの柱頭累積変位（加力方向にかかわらず柱頭加力点の移動距離を累積）を表し、図の上部には層間変形角 R と主要な載荷地点を併記した。図中の一点鎖線は主筋の降伏ひずみ（ 0.26% ）である。各面に位置する 4 本の柱中段筋（T1 は C2/C4/C5/C7, T2 は C2/C5/C8/C11）の接合部コア側中央部に貼付した 1 枚のひずみゲージの出力値、若しくは上下 2 枚のひずみゲージの平均値を各々用いた。

全試験体で最大耐力を迎えた $R=1.5\%$ 以降、梁が取り付けられない南西面の柱中段筋の圧縮ひずみ（図 4 の黒線、緑線）が梁側の北東面の柱中段筋（オレンジ線、青線）に比べて徐々に増加し、 $R=2.0\%$ から両者の乖離が顕著になった。南西面の柱中段筋は同 2.0% の南西地点 B 付近で圧縮降伏に至った。梁が取り付けられない側の柱梁接合部のかぶり及びコアコンクリートは梁側に比べて剥落が促進され、柱が負担する圧縮軸力がコンクリートから柱主筋に遷移したことを示す。一方、北東面の圧縮ひずみは微増に留まり、接合部降伏後に接合部内の柱主筋の負担圧縮軸力に偏りが生じた。これらの現象は最終的に上下の柱が互いに「く」の字に傾く軸崩壊機構を呈したと整合する。

試験体 T1 では $R=2.0\%$ の南地点 L から南西地点 M まで、及び $R=3.0\%$ の原点 o から南西地点 B までの区間で南西面の柱中段筋の圧縮ひずみが急増した。これはその 4 で述べる柱主筋の局所的な座屈によるものであり、ほぼ同柱主筋量を有する試験体 T3 も同傾向を示した。ただし、T3 の方が圧縮ひずみの増分は大きく、これは T1 より柱主筋径が小さいためと考える。T1 より柱中段筋本数を増やした試験体 T2 では $R=2.0\%$ 終了時まで圧縮ひずみは急増せず、その値も T1 より小さく推移した。軸崩壊発生時期は柱主筋比が同等の T1 及び T3 では $R=3.0\%$ 南地点 L の軸力変動時に対し、T2 は $R=4.0\%$ 西地点 A への載荷途中であった。T2 は柱中段筋本数もしくは柱主筋径の増加により柱主筋量が增大したことで、接合部降伏破壊後に柱主筋 1 本当たりの圧縮軸力負担が T1 及び T3 より軽減され、軸崩壊に至る骨組の水平変形性能が増進した。

5. まとめ

本報から得られた知見を以下に示す。

(1) 本実験の柱梁接合部は、最大耐力を迎えた層間変形角 1.5% の

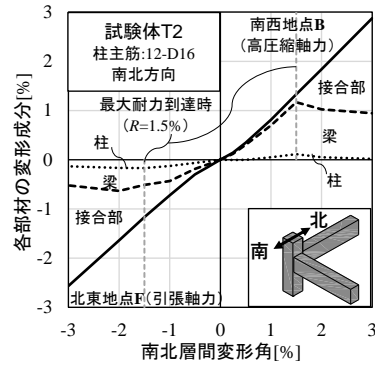


図 3 柱、梁及び柱梁接合部の変形成分

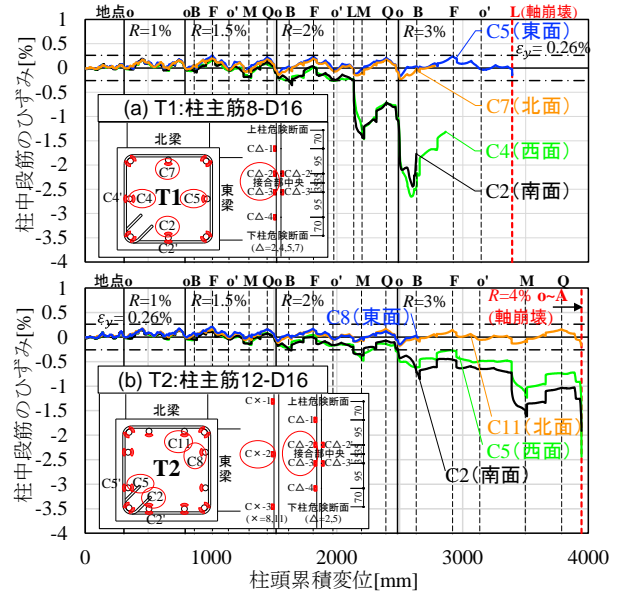


図 4 柱中段筋の軸ひずみの推移

- 2 方向水平載荷時に梁曲げ終局耐力及び接合部曲げ終局耐力にほぼ達した。その後、接合部損傷の進展に伴って、層間変形に対する柱梁接合部の変形成分が増大し、接合部降伏破壊が生じた。
- (2) 上柱軸力比 $0.04 \sim 0.13$ の範囲では、2 方向水平載荷状態の最大耐力が楕円補完した接合部曲げ終局耐力計算値とほぼ一致した。一方、上柱軸力比 $0.20 \sim 0.04$ の範囲では、接合部曲げ終局耐力の計算値が実験値を $7 \sim 14\%$ 上回った。引張軸力又は低圧縮軸力を受ける場合の接合部曲げ終局耐力の評価は今後検討が必要である。
- (3) 高圧縮軸力導入方向では、接合部降伏破壊発生以降に柱梁接合部の変形成分の割合が増大した。一方、引張軸力導入方向では接合部降伏破壊発生前から柱梁接合部の変形成分が支配的であり、引張軸力が接合部損傷に与える影響が大きいことを確認した。
- (4) 接合部降伏破壊後、梁の取り付けられない側の柱中段筋の圧縮ひずみが梁側の中段筋より増大し、両者の乖離が急増した。接合部内の柱主筋の負担圧縮軸力に偏りが生じ、軸崩壊挙動が促された。

[参考文献]

- 1) 楠原文雄, 塩原等: 鉄筋コンクリート造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.
- 2) 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.
- 3) 藤間淳, 王君穎, 佐野由宇, 鄭家齊, 石川巧真, 晉折雄, 北山和宏: 変動軸力および 2 方向水平力を受ける RC 隅柱梁接合部の降伏破壊および軸崩壊に関する研究 (その 1-その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 357-366, 2020.9
- 4) 楠原文雄, 塩原等: 接合部回転角を含む RC 造柱梁接合部部分架構の変形成分と応力およびその測定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.355-360, 2006.7

*1 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
 *2 鹿島建設株式会社 修士 (工学) (元東京都立大学大学院 大学院生)
 *3 明治大学大学院理工学研究科建築・都市学専攻 大学院生
 *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)

*1 Professor, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.
 *2 Kajima Corporation, M. Eng.
 *3 Graduate Student, Meiji University
 *4 Associate Professor, Meiji Univ., Dr. Eng.