

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5：隅柱梁接合部の軸崩壊機構の分類と変形性能

鉄筋コンクリート 隅柱梁接合部 変動軸力
2方向水平力 接合部降伏破壊 軸崩壊

正会員 ○石川巧真*1 藤間淳*4 佐野由宇*2
同 鄭家齊*3 王君穎*1 晉沂雄*2
同 北山和宏*1

1. はじめに

既報では隅柱梁部分架構の実験結果に基づき、柱梁接合部の降伏破壊から軸崩壊に至るまでの考察を行った。本報(その5)では本実験および既往研究をもとに軸崩壊機構について検討する。

2. 接合部破壊による軸崩壊機構

RC柱梁部分架構を用いた既往実験から、接合部軸崩壊の破壊機構を図1および写真1に示す3通りに分類した。

図1(a)の機構ⅠはHassan・Moehleら¹⁾の提案した、接合部のせん断摩擦理論による軸崩壊機構である。これは、接合部斜めひび割れ面に沿ったせん断摩擦抵抗が喪失することで軸崩壊に至るものである。ただし、当該研究では既存の古いRC建物を対象としており、接合部横補強筋が配されていないなど日本の実情とは異なる点が存在する。図1(b)の機構Ⅱは隅柱梁部分架構に一定圧縮軸力および2方向水平力を载荷した、片江・北山²⁾の実験で見られた破壊モードである。これは接合部出隅部のかぶりコンクリートが剥落し、コアコンクリート圧壊に伴って柱主筋が座屈することにより軸崩壊に至るものである。大変形時には下柱に対する上柱の回転角が増大することにより、上柱および下柱が互いに「く」の字状に傾くことが特徴である。今回の試験体F2, F3およびF4の軸崩壊モードはこの機構Ⅱに該当する。図1(c)の機構Ⅲは平面外柱梁部分架構に変動軸力および1方向水平力を载荷した、村上・前田ら³⁾の実験で見られた軸崩壊機構である。これは図2に示すように、負荷時の高引張軸力によって生じた斜めひび割れが正軸力時に閉じずに、高圧縮軸力を受ける上柱がその面に沿って下降して生じるものである。同文献により、負荷時に開く接合部斜めひび割れ面が、軸崩壊する際の危険断面となる可能性が示唆されており、本崩壊機構は比較的高引張および高圧縮の変動軸力が作用するときには発生すると考えられる。以上より、国内のRC建物においては機構Ⅱおよび機構Ⅲが接合部降伏破壊後の軸崩壊機構になり得る。次に機構Ⅱおよび機構Ⅲにより軸崩壊した試験体について考察する。

3. 水平2方向载荷が接合部軸崩壊に与える影響

図3に軸崩壊までに経験した、層間変形角ベクトル和の最大値-最大圧縮軸力比の関係を示す。図中の既往実験データは、接合部降伏破壊後に軸崩壊が生じた隅柱梁部分架構(水平2方向载荷)および平面外柱梁部分架構(水平1方向载荷, 変動軸力)に関する参考文献^{2),3),5),6)}から抜粋したものである。

軸崩壊モードは立体接合部で機構Ⅱ、平面接合部で機構Ⅲと各々異なった。隅柱梁部分架構 K2, K3 (文献2, 一定軸力, 表1参照), F2およびF3(変動軸力)では最大圧縮軸力比が0.13以下と小さいにも関わらず軸崩壊が生じており、軸崩壊までに経験した層間変形角ベクトル和の最大値はいずれも

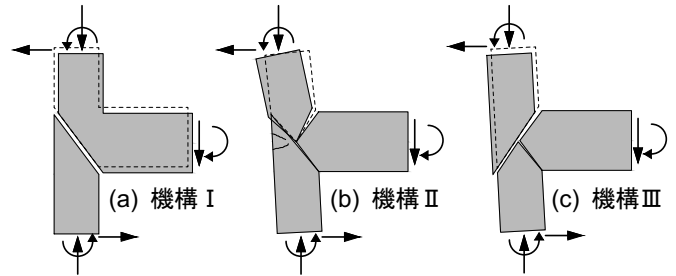


図1 接合部軸崩壊の破壊モード



写真1 既往実験における接合部軸崩壊の様子

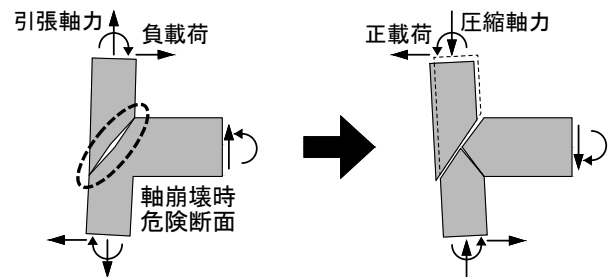


図2 機構Ⅲ³⁾の説明

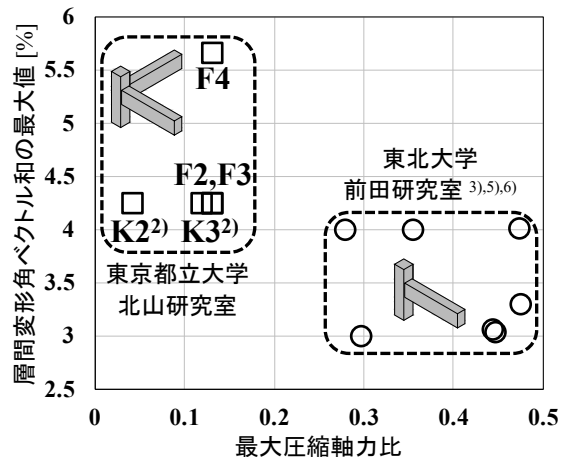


図3 層間変形角ベクトル和の最大値-最大圧縮軸力比

4.2%であった。隅柱梁部分架構 F2 の接合部補強比を2倍にした F4 では、層間変形角ベクトル和の最大値が 33%増加し、変形性能が増大した。一方、接合部補強比が隅柱梁部分架構 K2 および K3 と同程度で最大圧縮軸力比が 0.28 以上の平面外柱梁部分架構^{3),5),6)}では層間変形角 4%で軸崩壊が生じた。水平 2 方向載荷による接合部への損傷が水平 1 方向載荷の場合と比べて著しく、より小さな圧縮軸力比で軸崩壊に至ったと考える。

4. 水平耐力保持比と柱頭累積変形との関係

接合部降伏破壊した既往の立体試験体^{2),4)}と本実験とを対象に、隅柱梁接合部が軸崩壊するまでの水平耐力保持性能を表す指標として水平耐力保持比（架構の最大水平耐力に対する軸崩壊発生直前のサイクルで保持した水平耐力の比、正負載荷の小さい方を採用）を考える。この比が大きいほど、最大耐力後に突発的な軸崩壊が生じたことを表す。表 1 に既往試験体の諸元、図 4 に東西方向の水平耐力保持比—柱頭累積変形の関係を示す。柱頭累積変形は、軸崩壊発生までに柱頭が水平面に描いた軌跡を載荷方向と無関係に累加して求めた。

全試験体の分布に着目すると、柱頭累積変形の増加に伴い水平耐力保持比が減少した。これは柱頭累積変形が大きくなるまで軸崩壊を生じず、保有水平耐力が徐々に低下したことを示す。軸崩壊が生じた試験体 F4 (×印) を接合部補強比がその 1/2 である F2 と比較すると、軸崩壊発生時の柱頭累積変形が 44%増加し水平耐力保持比が 20%減少した。接合部横補強筋の増量が接合部の軸崩壊抑制に寄与した。また、軸崩壊が生じなかった試験体 Z2 および Z3 (文献 4, 一定軸力, △印)に着目すると、柱主筋比を 1.4 倍とすることで柱頭累積変形が 18%増加し、接合部降伏破壊が徐々に進展して水平耐力保持比が 26%減少した。よって、柱主筋量およびそれを拘束する接合部横補強筋量を十分に確保することが水平耐力保持性能の向上および軸崩壊の防止に有効である。一方、一定軸力を受け軸崩壊した試験体 K3 を圧縮軸力比がその 1/3 である K2 と比較すると、柱頭累積変形の減少に伴って水平耐力保持比が増加し、突発的に軸崩壊が発生した。これは圧縮軸力比が過大になることで、接合部降伏破壊が生じたのちに軸力保持性能が急激に低下したためである。試験体 K3 では柱主筋比および接合部横補強筋比が各々 0.83%、0.28%と国内法規で要求される下限程度であったため、柱頭累積変形が小さいうちに柱主筋の座屈が生じて柱梁接合部の軸崩壊に至った。

5. 柱主筋比と最大圧縮軸力比との関係

図 5 に隅柱梁部分架構の柱主筋比—最大圧縮軸力比の関係を示す。図中の試験体の接合部補強比はいずれも 16%程度で同一である。変動軸力を受ける試験体 F2 および F3 の柱主筋比 (1.65%) は一定圧縮軸力を受ける試験体 Z3 (未軸崩壊) と同程度であったが、最大圧縮軸力比が 0.13 となる場合に軸崩壊が生じた。隅柱梁部分架構において、変動軸力が軸崩壊に与える影響は大きいと考える。

6. まとめ

本報では接合部降伏破壊から軸崩壊に至るまでの破壊機構を分類し、軸崩壊した試験体の実験結果の考察から次の知見を得た。

表 1 既往の立体試験体^{2),4)}の諸元

試験体名	柱主筋比	接合部横補強筋比	接合部補強比	上柱軸力比	破壊モード
K2 ²⁾	0.83[%]	0.28[%]	24.8[%]	0.04(一定)	軸崩壊
K3 ²⁾				0.12(一定)	軸崩壊
Z2 ⁴⁾	2.55[%]	0.28[%]	15.4[%]	0.04(一定)	未軸崩壊
Z3 ⁴⁾ (スラブ付)	1.77[%]				未軸崩壊

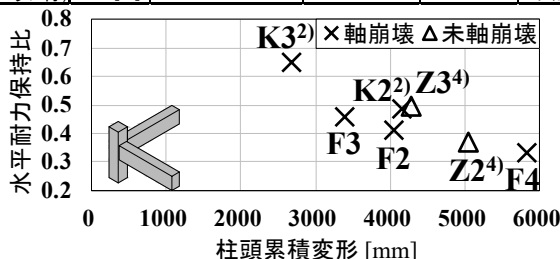


図 4 水平耐力保持比—柱頭累積変形

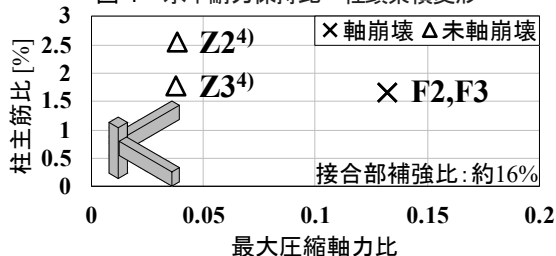


図 5 柱主筋比—最大圧縮軸力比

- (1) 変動軸力幅が小さく 2 方向水平力を受ける立体隅柱梁接合部の軸崩壊モードは機構Ⅱであり、変動軸力幅が大きい平面外柱梁接合部の既往実験で見られた機構Ⅲとは異なった。
- (2) 隅柱梁部分架構が変動軸力および 2 方向水平力を受けると最大圧縮軸力比が 0.13 のときに軸崩壊が生じた。
- (3) 軸崩壊までに経験した層間変形角ベクトル和の最大値および接合部補強比が同程度 (各々 4%, 25%) であっても、水平 2 方向載荷による接合部への損傷が水平 1 方向載荷と比べて著しく、圧縮軸力比が 0.13 以下のときに軸崩壊に至る場合があることを示した。
- (4) 接合部補強比を 17% から 34% へ倍増することで接合部降伏破壊が徐々に進展し、柱梁接合部の軸崩壊発生時の柱頭累積変形が 44% 増加 (すなわち変形性能が増大) した。柱梁接合部の横補強筋の増量が接合部の軸崩壊抑制に寄与した。

謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金・基盤研究 C (研究代表者: 北山和宏) により行った。本研究の実施にあたり、東京鐵鋼 (株) から鉄筋を提供していただき、高周波熱練 (株) からは試験体作製全般に渡って援助を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) W. M. Hassan, and J. P. Moehle : Quantification of Residual Axial Capacity of Beam-column Joints in Existing Concrete Buildings under Seismic Load Reversals, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 12–14 June 2013.
- 2) 片江 弘, 北山和宏 : 3 方向加力される鉄筋コンクリート立体隅柱梁接合部の耐震性能に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 713 号, pp.1133-1143, 2015 年 7 月.
- 3) 村上久志, Hu Yanbing, 菅 沂雄, 前田匡樹 : 高変動軸力を受ける RC 造外柱梁接合部の破壊性状と構造性能, コンクリート工学年次論文集, 第 40 巻第 2 号, pp.223-228, 2018 年 7 月.
- 4) 石塚裕彬, 北山和宏 : 2 方向水平力を受ける鉄筋コンクリート造立体隅柱梁接合部の耐震性能および立体破壊モデルに基づく曲げ終局耐力の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 729 号, pp.1881-1891, 2016 年 11 月.
- 5) 村上久志, 菅 沂雄, 鈴木裕介, 前田匡樹 : 接合部横補強筋及び軸力が RC 造ト形柱梁接合部の構造性能に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 39 巻第 2 号, pp.205-210, 2017 年 7 月.
- 6) 西田智康, 鈴木裕介, 前田匡樹 : 変動軸力の大きさが接合部降伏するト型柱梁接合部の破壊性状及び構造性能に与える影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 41 巻第 2 号, pp.253-258, 2019 年 7 月.

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科建築学域
 *2 明治大学大学院 理工学研究科建築・都市学専攻
 *3 東京工業大学大学院 (元明治大学)
 *4 株式会社フジタ (元首都大学東京 現東京都立大学)

*1 Tokyo Metropolitan University
 *2 Meiji University
 *3 Tokyo Institute of Technology
 *4 Fujita Corporation