

# 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: 実験概要

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

鉄筋コンクリート (RC) 建物の耐震設計では柱梁接合部のせん断破壊を防ぐため、接合部のせん断耐力が入力せん断力を上回るように規定する<sup>1)</sup>。一方、塩原は柱梁接合部の曲げ抵抗による破壊機構<sup>2)~4)</sup> (以下、接合部降伏破壊) を提唱し、接合部せん断余裕度を十分に確保しても、柱梁曲げ耐力比 (接合部節点での梁曲げ終局モーメントに対する柱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て梁曲げ終局耐力が発揮されないことを指摘した。2016年の熊本地震では低層RC建物の外周の側柱における柱梁接合部の降伏破壊に伴い、柱圧縮軸力を保持できなくなる接合部軸崩壊が生じて建物の部分崩壊に至った被害が報告された<sup>5)</sup>。

Hassan・Moeble<sup>6)</sup>はスラブを付加した立体隅柱梁部分架構に変動軸力および2方向水平力を導入する静的載荷実験を行い、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柱梁接合部の軸崩壊が生じるとした。ただし、接合部のせん断破壊に着目した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。降伏破壊する接合部の軸崩壊に着目した実験研究は少なく、平面外柱梁部分架構を対象とした村上<sup>7)</sup>や西田<sup>8)</sup>による研究、および立体隅柱梁部分架構を対象とした藤間<sup>9)</sup>による研究のみである。

立体架構を扱った藤間<sup>9)</sup>の実験 (上柱軸力比 0~0.13) で見られた接合部の軸崩壊機構は、平面架構に高変動軸力を導入した村上<sup>7)</sup>の実験 (上柱軸力比 0.49~0.42) で見られたそれとは異なった。変動軸力が隅柱梁接合部の降伏破壊後の軸崩壊に与える影響を検証するため、本研究では立体隅柱梁部分架構に引張から圧縮まで変動する柱軸力および2方向水平力を導入する静的載荷実験を行った。柱主筋座屈を軸崩壊の要因と考え、柱中段筋本数および柱主筋径を実験変数とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図1に試験体の配筋、表1に試験体諸元および材料特性を示す。本研究では立体隅柱梁部分架構試験体を3体作製した。梁断面寸法 (幅 250mm×せい 400mm) および柱断面寸法 (幅 310mm×せい 310mm) は既往試験体 F3<sup>9)</sup>に統一し、全試験体で共通とした。実験変数は柱主筋の配筋であり、試験体 T1 で 8-D16(SD490)とし、試験体 T2 では柱中段筋本数を各面1本から2本に増やして 12-D16(SD490)とした。これは、文献<sup>10)</sup>の柱梁接合部の保証設計において接合部内のコアコンクリートを拘束する目的で設けられた「直交梁が接続しない面の柱主筋は、当該面に4本以上を配置する」という構造規定の妥当性を検証するためである。試験体 T2 の柱主筋径を小さくして

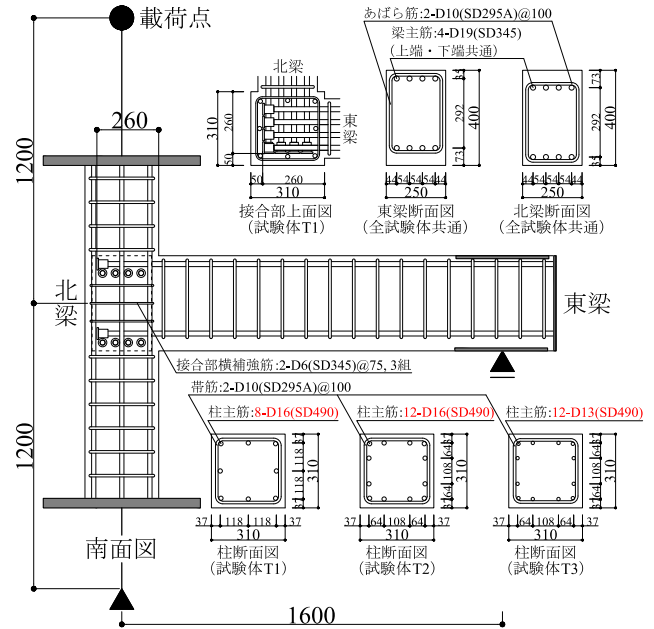


図1 試験体の配筋

表1 試験体諸元および材料特性

試験体名	F3 <sup>9)</sup>	T1	T2	T3	
試験体形状	立体隅柱梁部分架構				
東梁・北梁	幅×せい	250[mm]×400[mm]			
	主筋	上端・下端ともに4-D19(SD345)			
柱	あばら筋	2-D10(SD295A)@100			
	幅×せい	310[mm]×310[mm]			
	主筋	8-D16(SD490)	12-D16(SD490)	12-D13(SD490)	
	柱主筋比	1.65[%]	2.48[%]	1.58[%]	
上柱	帯筋	2-D10(SD295A)@100			
	軸力	0~840[kN]	-170~855[kN]	-255~842[kN]	-163~836[kN]
下柱	軸力	-134~1019[kN]	-296~1039[kN]	-387~1026[kN]	-283~1015[kN]
	軸力比*	-0.16~0.16	-0.35~0.16	-0.30~0.16	-0.35~0.16
接合部横補強筋	2-D6(SD345)@75, 3組				
接合部補強比 <sup>7)</sup>	17.0[%]	15.4[%]			
柱梁曲げ耐力比	0.97~3.13	0.80~3.31	1.21~3.90	0.77~3.17	
接合部せん断余裕度	1方向載荷	1.5	1.6	1.5	1.5
	2方向載荷	1.1	1.1	1.1	1.1
強度低下率 <sup>11)</sup>	1方向載荷	0.94~1.28	0.90~1.32	1.00~1.41	0.89~1.30
想定破壊モード	接合部降伏破壊後の軸崩壊				

\*圧縮軸力比=N/bDσ<sub>g</sub>(正号) \*引張軸力比=N/Σa<sub>g</sub>σ<sub>y</sub>(負号) N:軸力(圧縮:正) b:柱幅 D:柱せい  
σ<sub>g</sub>:コンクリートの圧縮強度 Σa<sub>g</sub>:柱主筋の全断面積 σ<sub>y</sub>:柱主筋の降伏応力度  
p<sub>m</sub>:接合部横補強筋比(=Σa<sub>m</sub>/b<sub>j</sub>) Σa<sub>m</sub>:接合部横補強筋の全引張断面積 j:梁主筋上下の重心間距離

鋼材	降伏応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏ひずみ [%]	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	破断伸び [%]
D6(SD345)**	356.9	0.37	560.6	18.6
D10(SD295A)	358.0	0.17	497.8	21.4
D13(SD490)	537.1	0.26	704.6	15.7
D16(SD490)	535.4	0.26	690.8	17.2
D19(SD345)	385.4	0.19	548.8	20.7

コンクリート	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	圧縮強度時ひずみ [%]	ヤング係数*** [kN/mm <sup>2</sup> ]	割裂引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
試験体T1	68.4	0.26	35.3	3.73
試験体T2	67.4	0.28	34.4	4.04
試験体T3	66.9	0.26	35.4	3.57

\*\*\*コンクリートのヤング係数は圧縮強度の1/3時の割線剛性とした。

配筋を 12-D13(SD490)とした試験体 T3 の柱主筋比は 1.58%と、試験体 T1 のそれ (1.65%) にほぼ等しい。梁主筋は接合部内に機械式定着し、その定着長さは柱せいの 0.84 倍の 260mm で

ある。本実験では中層建物の中層部を想定し、全試験体の上柱に与える長期軸力比を 0.04、軸力比の変動幅を-0.20~0.13 (圧縮：正) とした。軸力は最大耐力後の梁せん断力の低下に伴う軸力低下を考慮しない場合を想定し、層間変形に比例して変動させた (2.2 節で後述)。ここで、引張軸力比は全柱主筋の降伏時引張力に対する柱軸力の比として算定した。梁主筋降伏時引張力に対する接合部横補強筋降伏時引張力の比として定義される接合部補強比 $\eta$ は全試験体で 15.4% である。表 1 に示す鉄筋 D6 の降伏ひずみ (0.37%) は 0.2% offset 法によるが、その 2 以降の実験結果の検討における D6 の降伏判定では材料試験による応力度-ひずみ関係をバイリニアモデルに置換したときの二次勾配開始点である 0.19% を用いた。梁および柱の曲げ終局耐力は平面保持を仮定した断面解析により算出し、柱梁曲げ耐力比を求めた。柱梁曲げ耐力比 (0.77~3.90) は荷重方向および柱軸力比によって変化するため、その値を図 2 に示す。接合部せん断終局耐力は文献<sup>1)</sup>によって算出し、水平 1 方向および 2 方向荷重時の接合部せん断余裕度を 1.5 程度および 1.1 として柱梁接合部のせん断破壊を防止した。文献<sup>1)</sup>による強度低下率 $\beta_j$  (0.89~1.41) は梁曲げ終局耐力に対する接合部曲げ終局耐力の比であり、接合部曲げ終局耐力は文献<sup>12)</sup>に基づいて精算した。

## 2.2 荷重計画

図 3 に荷重装置、図 4 に柱頭に与える荷重経路を示す。荷重は柱頭の三軸一点クレーブスを介し、水平 2 方向および鉛直方向の計 3 基のジャッキにより行った。柱脚はピン支持、梁端はローラー支持であり、梁は東と北に設置した。両梁の支持条件および柱芯から梁端支持点までの距離 (1600mm) は共通である。柱軸まわりの回転は水平パンタグラフにより拘束した。柱頭の荷重経路は口の字形とし、第 1 サイクルでは原点から西方向に所定の変位を与え、その変位を保ちつつ南方向に変位を与え、以降は反時計回りに 1 周し原点に戻る。第 2 サイクルでは時計回りに 1 周する。層間変形角 (柱頭層間変形を柱の支持点間距離 2400mm で除した値) 0.25%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 3.0%, 4.0% をそれぞれ荷重し、試験体 F3<sup>9)</sup> と同様に層間変形角 0.25% のみ第 1 サイクル、その他の層間変形角では第 1 および第 2 サイクルを 1 回ずつ荷重した。

図 5 に軸力変動ルールを示す。軸力は試験体 F3<sup>9)</sup> と同じく層間変形に比例させ、正側 (上柱が梁から遠ざかる方向) で高圧縮、負側 (上柱が梁に近づく方向) で引張となるように上柱軸力を変動させた。試験体 F3<sup>9)</sup> の最小軸力 0kN に対して、全試験体の最小軸力を引張軸力比-0.20 に小さくした。ただし、2 方向荷重時に柱軸力を細かく変動させることは煩雑なため、図 4 のように正立時の柱頭荷重点を原点とした平面座標系において、象限ごとに一定軸力を与えることで軸力変動を簡略に考慮した。原点 o から地点 A および地点 R から原点 o<sup>o)</sup> の区間では軸力を常に変動させ、それ以外の区間では前述の象限ごとに一定軸力とした。第 2 および第 4 象限では長

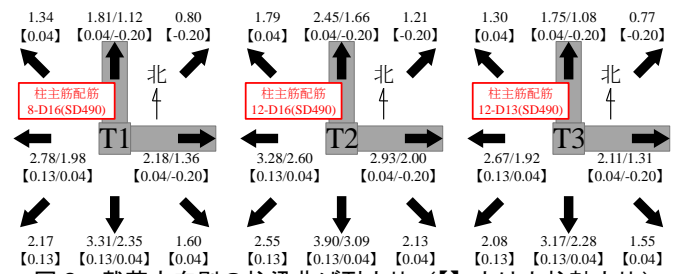


図 2 荷重方向別の柱梁曲げ耐力比 (【】内は上柱軸力比)

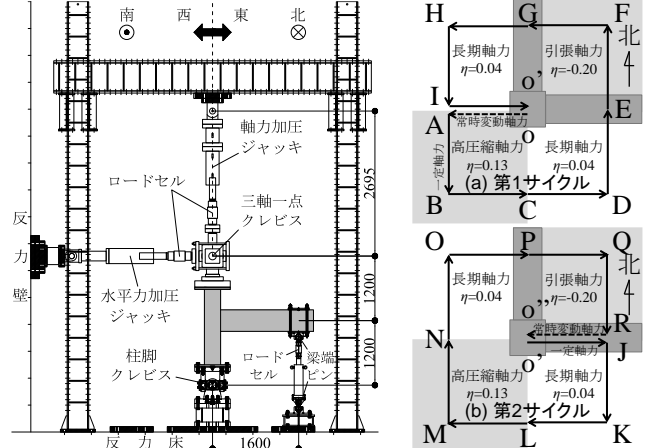


図 3 荷重装置 (南面図)

図 4 荷重経路

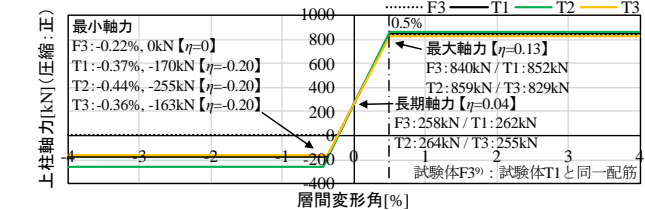


図 5 軸力変動ルール

期軸力比 0.04 を付与した。図 2 に示す柱梁曲げ耐力比は北東荷重時 (地点 F, Q) に最小となり、その地点で接合部降伏破壊が発生し、軸力が最大となる南西荷重時 (地点 B, M) に軸崩壊が発生することを想定した。柱梁接合部内の柱主筋の局部座屈、コアコンクリートの剥落や膨張およびそれに伴う上下柱の相対回転角 (その 4 で後述) の急増によって接合部が著しく損傷する時点を軸崩壊と判断し、荷重を終了した。

## 3. まとめ

本報 (その 1) では、鉄筋コンクリート隅柱梁部分架構の耐震性能に関する構造実験の概要を報告した。謝辞はその 4 に示す。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999.8
- 2) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：見逃された破壊機構、日本建築学会構造系論文集、Vol. 73, No. 631, pp. 1641-1648, 2008.9
- 3) 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
- 4) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：梁曲げ降伏型接合部の耐震設計、日本建築学会構造系論文集、Vol. 74, No. 640, pp. 1145-1154, 2009.6
- 5) 齋藤真也、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) Hassan, W. M. 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.
- 7) 村上久志、Hu Yanbing、音近雄、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、Vol. 40, No. 2, pp. 223-228, 2018.7
- 8) 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 T 形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検討、コンクリート工学年次論文集、Vol. 41, No. 2, pp. 253-258, 2019.7
- 9) 藤間淳、王君頌、佐野由宇、鄭家齊、石川巧真、音近雄、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集、構造 IV, pp. 357-366, 2020.9
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建造物の等価線形化法に基づく耐震性能評価型設計指針 (案)・同解説、2019.3
- 11) 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程 (案)・同解説、2016.4
- 12) 柳原文雄、塩原等：鉄筋コンクリート造 T 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

\*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 Univ.  
 \*4 Associate Professor, Meiji Univ., Dr. Eng.