

鉄筋コンクリート十字形柱梁接合部の破壊機構の検証に関する3次元FEM解析

正会員 ○楊 森*
同 北山 和宏**鉄筋コンクリート 柱梁接合部 有限要素解析
単調載荷解析 付着すべり

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 柱梁接合部パネルの新しい破壊機構モデルとそれに基づく耐震設計手法が塩原によって提案されている¹⁾。そこで通常の建物のように、柱に圧縮軸力が作用し、かつ柱幅は梁幅よりも大きいという条件のもとで、塩原の提案した破壊機構を検証するために、2011年に石木・平林・北山らが静的正負交番繰り返し水平加力実験を実施し²⁾、その結果を楊・北山が分析した³⁾。

本研究では、それらの実験を対象にして三次元有限要素 (FEM) 解析を行い、実験結果との比較により解析モデルの適用性を確認した上で、解析結果より部材内部の応力状態、ひび割れ状況などを考察し、十字形柱梁接合部の破壊機構について検討する。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象試験体は、基準とした試験体 J2 である。解析対象試験体の破壊形式は、梁・柱主筋の降伏後に接合部の主対角ひび割れの拡大が顕著となり、接合部のコンクリートの圧壊が進行する柱梁接合部曲げ破壊と判定した。表-1 に試験体諸元、表-2 にコンクリートおよび鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。図-1 に解析した試験体 J2 の形状、断面寸法及び配筋状況等の試験体概要を示す。梁の断面は 250×350mm、柱断面は 350×350mm である。

2.2 解析モデル

本研究では、大林組が開発した非線形有限要素汎用解析ソフトウェア FINAL⁴⁾を用いた。試験体形状の対称性を考慮して、試験体の断面幅方向中央で切断した 1/2 の部分をモデル化して、せん断補強筋の拘束効果を表現するために 3次元解析を実施し、変位制御の一方単調載荷とした。コンクリートには 8 節点ソリッド要素を用い、各鉄筋をトラス要素により試験体の配筋状況を忠実に再現した。柱と梁の主筋に関しては、コンクリートと鉄筋の節点を別々に定義し、その間に接合要素を挿入して、両者の付着すべり挙動を考慮した。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性体を仮定し、ひび割れは最大 9 方向のひび割れが考慮できる非直交分散ひび割れモデル⁵⁾を用いた。主応力等価一軸ひずみ関係における圧縮側の最大強度に至るまでの上昇域を修正 Ahmad モデル⁶⁾を用い、最大強度後は破壊エ

ネルギーに基づく中村・檜貝モデル⁷⁾を用いた。引張側に関しては、ひび割れ発生までは線形を仮定し、ひび割れ後は出雲らのモデル⁸⁾($c=1.0$)により若干の引張軟化特性を考慮した。3 軸応力下の破壊条件は畑中らの係数⁹⁾を用いた 4 パラメータモデルにより決定した。ひび割れ面のせん断伝達特性にはコンクリート強度、配筋量およびひび割れ面の平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係で定義した長沼モデル¹⁰⁾を用いた。

表-1 試験体諸元

		J2
梁	主筋	5+2-D13(SD345)
	あばら筋(あばら筋比)	2-D10@200(0.29%)
柱	主筋	12-D13(SD345)
	帯筋(帯筋比)	2-D10@100(0.41%)
	圧縮軸力(kN)	413
接合部	横補強筋(横補強筋比)	□-D10×2(0.34%)

表-2 コンクリートと鉄筋の材料特性

鋼材	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
D10(SD345)	367	574
D13(SD345)	371	552
	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)
コンクリート	37.9	2.8

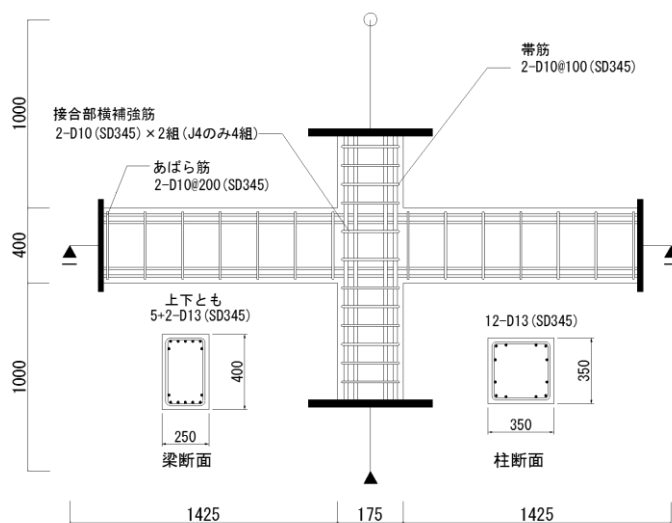


図-1 試験体概要

表-3 付着要素材料特性

	位置	最大付着応力 (N/mm ²)	最大付着応力時すべり量(mm)
梁主筋	接合部内	11.5	0.4
	接合部外	8.0	0.8
柱主筋	接合部内	6.4	0.4
	接合部外	3.1	0.4

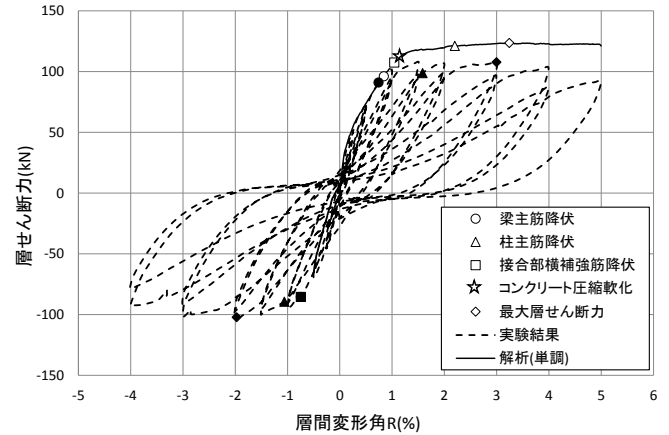
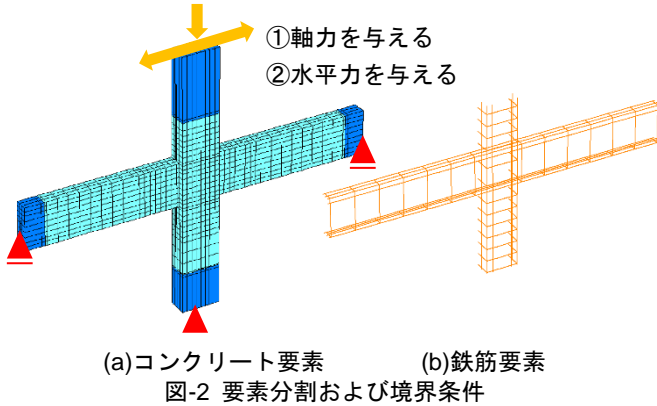
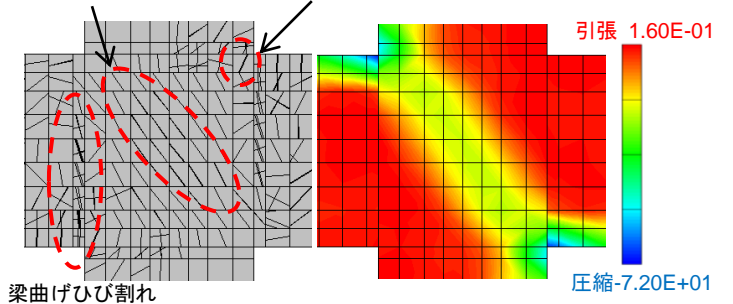


図-3 層せん断力ー層間変形角関係
接合部斜めひび割れ 接合部入り隅部ひび割れ



(a)ひび割れ図 (b)最小主応力コンター図(単位:N/mm²)
図-4 単調載荷解析結果(最大耐力時)

鉄筋の応力-ひずみ関係はバイ線形型として、履歴特性には修正 Menogotto-Pinto モデル¹¹⁾を用いた。鉄筋とコンクリートとの間の付着すべり特性は、Naganuma らの曲線モデル⁵⁾を用いた。柱・梁部材および接合部内における付着すべり特性を実験値に基づいてそれぞれ設定した。表-3 に最大付着強度およびその時のすべり量を示す。図-2 に解析対象試験体の要素分割および境界条件を示す。

3. 解析結果

図-3 に単調載荷解析および実験から得られた基準試験体 J2 の層せん断力ー層間変形角関係の比較を示す。○は梁主筋降伏、△は柱主筋降伏、□は接合部横補強筋降伏、☆はコンクリート圧縮軟化、◇は最大層せん断力を各々示す。解析結果の初期剛性は実験結果と良好な対応を示した。単調載荷解析では層間変形角 0.8%時に、梁危険断面位置で梁主筋降伏が発生し、実験結果とほぼ一致したが、最大耐力は 123kN で、実験値 108kN より 13%大きかった。解析では最終的に梁曲げ破壊となった。

図-4 に単調載荷解析における最大耐力時のひび割れ図および最小主応力コンター図を示す。接合部入り隅部にひび割れが徐々に発生していくことが見られる。最小主応力コンター図により柱梁接合部内に幅の狭い圧縮ストラットが見られるが、梁付け根コンクリートに損傷が集中したことが分かる。実験では正負交番繰返し荷重を受け、負荷時に発生する入隅部ひび割れが正荷時に発生した接合部斜めひび割れと貫通した。これより接合部主対角ひび割れの拡大が顕著となって接合部内に損傷が集中し、耐力低下が発生した。単調載荷解析ではこのような入隅部ひび割れと接合部斜めひび割れとの貫通が生じない。そのため梁危険断面に損傷が集中して最大耐力が実験より大きくなり、破壊機構が異なる結果となった。

4. まとめ

柱梁接合部が曲げ破壊した RC 十字形柱梁接合部部分架構について有限要素解析を行い、復元力特性、接合部内のひび割れ状況および応力状況を考察した。層せん断力ー層間変形角関係において、単調載荷解析では初期剛性が良い対応を示したが、梁主筋降伏後に違いが生じ、最大耐力が実験結果より大きく、最終的に梁曲げ破壊になった。実験の柱梁接合部曲げ破壊を再現できなかった。

参考文献

1) 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 2) 石木健士朗,平林幸泰,北山和宏,他:RC 十字形柱梁接合部パネルの破壊機構に関する実験的研究,日本建築学会学術講演梗概集 C-2 構造IV:2011 pp.497-498 3) 楊森,北山和宏:鉄筋コンクリート十字形柱梁接合部の破壊モデルの検証に関する実験的研究, 日本地震工学会年次大会梗概集 (CD-Rom) ,2013 年 11 月,pp.91-92. 4) 米澤他:正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の三次元非線形 FEM 解析,大林組技術報,No.67,2003 年,pp.1-8 5) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, August., 2004. 6) 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集,第 474 号, pp.163-170,1995.8 7) H. Nakamura, T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10 8) 出雲淳一, 他:面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9 9) 畑中重光, 他:各種コンクリートの圧縮靱性の統一評価(その 1: 低側圧 3 軸圧縮実験), AIJ 大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.189 -190, 1985.10 10) 長沼一洋:平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3 11) Ciampi,Vet al.:Analytica Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23,Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982

* 首都大学東京大学院, 修士 (工学)
**首都大学東京大学院 建築学域 教授, 工学博士

*Tokyo Metropolitan University, M. Eng.
**Professor, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.