

論文 超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断耐力に関する非線形有限要素解析

柏崎隆志^{*1}・永井智之^{*2}・野口博^{*3}

要旨：コンクリートには設計強度Fc1000、梁主筋にはSD685レベル以上の高強度材料を用いた内柱・梁接合部の既往の研究から、破壊モードが接合部せん断破壊先行型の平面接合部試験体と梁曲げ破壊型の直交梁付き立体接合部試験体を解析対象として選び、3次元非線形有限要素(FEM)解析を行った。解析では、梁危険断面で顕著となる曲げひび割れの開口を考慮していないために、実験と比較して、初期剛性はやや高めとなつたが、最大耐力、破壊モードや鉄筋ひずみについてはかなり良好な対応を示した。

キーワード：高強度鉄筋コンクリート、柱・梁接合部、せん断耐力、非線形FEM解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)造建物が大きな地震力を受けると、建物内の柱・梁接合部は2方向載荷状態となり、接合部コンクリートは3軸応力状態となる。また、この場合、接合部コンクリートは、柱軸力、接合部横補強筋、直交梁や床スラブの影響で、3次元的な拘束状態にあるといえる。このような立体接合部に対する耐震設計について、日本建築学会の『鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針』[1]（以下、学会指針）では、柱軸力比 σ_0 / σ_B （ σ_0 ：柱軸応力度、 σ_B ：コンクリート圧縮強度）=0、0.2の立体十字型内柱・梁接合部の45度繰り返し加力実験より、内柱・梁接合部では柱の曲げ強度にみられるような2軸方向の耐力低減を考慮しなくとも良いとされている。しかし、学会指針は普通強度材料を対象とし、また数少ない実験結果に基づいていているので、十分合理的な設計法とはいえない。そこで、本研究では高強度材料を用いたRC造内柱・梁接合部の3次元非線形有限要素(FEM)解析を行い、履歴特性、変形、鉄筋ひずみや内部応力状況などの検討を行った。

表-1 試験体諸元と材料特性

試験体名		平面接合部 OKJ3		立体接合部 I2		
梁	主筋 スチーブ	10-D13 2-D6@50 $P_w=0.63\%$		8-D16 2-U6.4@35 $P_w=0.86\%$		
柱	主筋 アーフ	22-D13 2-D6@40 $P_w=0.53\%$		16-D19 2-U6.4@40 $P_w=0.50\%$		
接合部	アーフ	4-D6×3t+@50 $P_w=0.54\%$		4-φ6×2t+@30 $P_w=0.39\%$		
1/4fc割線剛性 ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)			4.42	4.00		
圧縮強度 (kgf/cm^2)			1091	1007		
強度時ひずみ (μ)			2860	2752		
割裂強度 (kgf/cm^2)			61.3	43.0		
鉄筋	呼び名	D6	D13	D16	D19	U6.4
	ヤング係数 ($\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$)	1.86	1.90	1.854	1.843	1.90
	降伏応力度 (kgf/cm^2)	9740	7320	8140	7610	13340
	降伏時歪(μ)	7340	5870			3670
	最大応力度 (kgf/cm^2)	11630	7820	8770	8220	14260

*1：千葉大学助手

工学部建築学科、工修（正会員）

*2：千葉大学大学院生

工学研究科建築学専攻（正会員）

*3：千葉大学教授

工学部建築学科、工博（正会員）

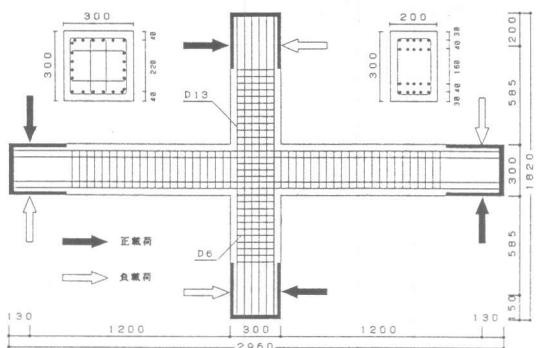


図-1 配筋詳細（平面接合部OK J 3）

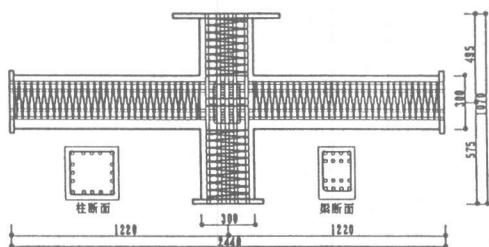


図-2 配筋詳細（立体接合部I 2）

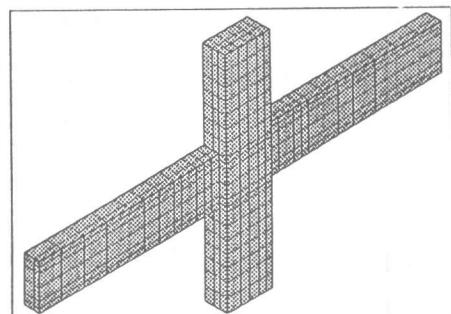


図-3 要素分割（平面接合部OK J 3）

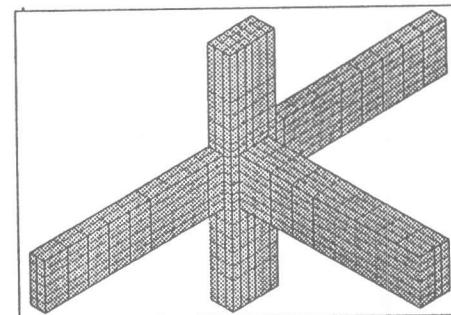


図-4 要素分割（立体接合部I 2）

2. 解析方法

2. 1 解析対象試験体

本解析では、解析対象試験体を破壊モードが接合部せん断破壊先行型（J型）である柏崎、野口による平面接合部OKJ3試験体[2]と梁曲げ降伏先行型（B型）である李、北山、小谷、青山による直交梁付き立体柱・梁接合部I2試験体[3]の2体とする。OKJ3は、実大構造物の約1/3スケールの平面十字型接合部で、階高は147cm、梁スパンは270cmである。柱、梁断面は、各々30cm×30cm、20cm×30cmである。材料は、コンクリート強度が 1091kgf/cm^2 、梁主筋降伏応力度が 7320kgf/cm^2 の高強度材料を使用している。接合部横補強筋比は0.54%である。加力は柱頭に85tonfの定軸力を与えた後、両梁端に変位制御による正負繰り返し逆対称加力が行われている。I2は、床スラブなしの直交梁付き十字型接合部で、階高、スパンや柱、梁断面はOKJ3と同様である。材料は、コンクリート圧縮強度が 1007kgf/cm^2 、梁主筋降伏応力度が 8140kgf/cm^2 の高強度材料を使用している。接合部横補強筋比は0.39%である。加力は32.4tonfの定軸力を与えた後、柱頭に変位制御による田の字型水平方向繰り返し載荷が行われた。OKJ3とI2の試験体諸元と材料特性を表-1、試験体配筋図をそれぞれ図-1、2に示す。平面接合部OKJ3の実験での破壊モードは、層間部材角 $Rs=1/33\text{rad}$ で接合部せん断破壊がかなり進行して、最大耐力に至り、更に耐力時には梁主筋（2段筋）の降伏、すなわち梁曲げ降伏が生じていないことから、接合部せん断破壊先行型と判断されている。また、立体接合部I2は、NS方向の最大耐力直前（ $Rs=1/17\text{rad}$ ）に梁曲げ降伏が生じた。その後柱および梁の付け根部分のコンクリートが圧壊し、梁曲げ変形成分が全体層間変形に対して60%程度であることから、梁曲げ降伏先行型と判断されている。

2. 2 解析モデル

本解析では、汎用3次元非線形FEM解析プログラムABAQUSに、内田、雨宮、野口[4]や米澤、野

口[5]が開発したコンクリートモデルをユーザーアプリケーションとして組み込んだ解析プログラムを使用した。また解析はEWS（エンジニアリング・ワークステーション）を用いて行った。

平面接合部OKJ3と直交梁付き立体接合部I2の要素分割をそれぞれ図-3、4に示す。OKJ3とI2の実験時層せん断力-層間変位関係[2][3]は、主に一方向加力時の履歴特性を表しているので、本解析では、梁軸方向のみを加力軸とし、またこの加力軸に対して左右が対称となるので、柱、梁軸を通る鉛直面から片側半分を解析対象領域として要素分割を行った。鉛直切断面は面ローラー支持とした。更に柱頭、柱脚や両梁端の境界条件は実験に従った。

コンクリート要素：コンクリート要素として8節点ソリッド要素を用いた。コンクリートは直交異方性材料とし、Darwin-Pecknoldらの等価一軸ひずみモデルを、Murrayらが3次元に拡張したものを使用した。破壊条件には、William-Warnkeの3パラメータモデルに、更に2つの自由度をえた5パラメータモデルを用いた。なお、5つのパラメータは、Kupferの平板実験の結果を用いて決定した。また、図-5に示すように、圧縮応力-圧縮ひずみ関係の上昇域は、高強度コンクリートの直線化を表現するために、式(1)のFafitis-Sharモデル[6]を用いた。ここで、式(1)中の各記号は、 σ_c : コンクリート応力度(kgf/cm^2)、 σ_b : コンクリート強度(kgf/cm^2)、 ε_c : コンクリートひずみ(無次元)、 ε_b : コンクリート強度時ひずみ(無次元)、 E_c : コンクリート初期剛性(kgf/cm^2)を表す。

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \sigma_b [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_b)^A] \\ A &= E_c \cdot \varepsilon_b / \sigma_b\end{aligned}\quad (1)$$

接合部内コンクリートは、横補強筋などの拘束効果を考慮して、最大圧縮強度以降の応力-ひずみ関係にKent-Parkモデル[7]を用い、ひずみ軟化域でのじん性向上を考慮した。コンクリートのポアソン比には、圧縮ひずみの関数で表現したMurrayらの提案式を用いた。ひび割れは、分布ひび割れモデルを用いて要素内積分点で評価し、ひび割れ平行方向のせん断剛性は無視した。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減モデルとして、ひび割れ直交方向の引張ひずみの関数とした飯塚、野口モデル[8]を用い、前述の5パラメータモデルにより決定された各応力状態の圧縮強度を低減させた。材料定数は、実験でのコンクリートシリンダーの圧縮、割裂試験から求めた。

鉄筋要素：柱、梁主筋や各部材横補強筋は、鉄筋軸方向のみに剛性を有する2節点線材要素を用いて表現した。また、材料定数は実験での引張試験結果を用い、バイリニア型の形状とした。

ボンドリンク要素：柱、梁主筋などの鉄筋と鉄筋周辺コンクリート間の付着特性は、完全付着として与えた。従って、接合部からの梁主筋の抜け出しなどは考慮していない。

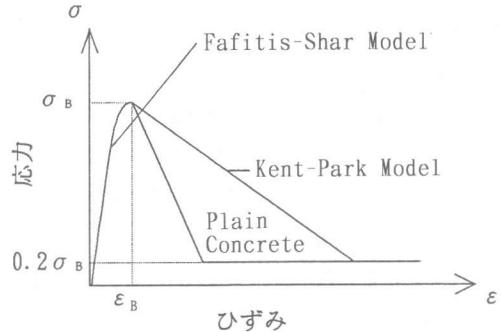


図-5 コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係

3. 解析結果

3. 1 平面接合部OKJ3[2]

3. 1. 1 履歴特性

平面接合部OKJ3の層せん断力－層間変位関係について、解析と実験の比較を図-6に示す。層間部材角 $Rs=1/200\text{rad}$ 程度までの初期剛性は、実験値に比べ、解析値がやや剛めの結果となった。これは、梁危険断面での局部的な梁曲げひび割れが解析で考慮されていないことによると考えられる。最大層せん断力 P_s は、実験値の $P_s=29.9\text{tonf}$ に対し、解析値が $P_s=33.5\text{tonf}$ で、実験値より約10%程高い結果となった。最大層せん断力に達するまで、実験、解析とも梁曲げ降伏は生じなかった。更に、解析では $P_s=31.7\text{tonf}$ で接合部コアコンクリートの幾つかのコンクリート要素がひずみ軟化域に達し、層せん断力の上昇が頭打ちとなり、最大耐力に達したので、破壊モードは実験と同様に接合部破壊先行型である。最大層せん断力や破壊モードの比較より、解析は実験との対応も良好であった。

3. 1. 2 変形と内部応力状況

図-7、8に、OKJ3の最大層せん断力付近での変形とコンクリート応力センターを示す。変形図では、両梁端加力による梁曲げ変形、および接合部せん断変形が顕著である。また、定性的ではあるが、2次元解析では得られない接合部パネルコンクリートの直交方向ひずみがかなり卓越している。この直交ひずみは、柱、梁の曲げ圧縮ゾーンから接合部へコンクリート斜め圧縮力が伝達されることにより生じると考えられる。応力センター図では、柱、梁端部から接合部へ伝達されるコンクリートアーチ機構と接合部パネルの右上から左下の対角線上に形成された斜め圧縮ストラット機構が顕著である。接合部中央部の主たる圧縮ストラットの応力度は、 $363\sim527\text{kgf/cm}^2$ でコンクリート圧縮強度の約40%である。

3. 1. 3 鉄筋ひずみ

図-9に、OKJ3の接合部内梁通し（1段筋）筋のひずみ分布を示す。OKJ3は、実験において顕著な付着劣化がみられなかつたので、完全付着を仮定した解析値が実験値と良好な対応を示した。更に、接合部せん断破壊が顕著なOKJ3の接合部横補強筋（中子筋）ひずみ状況を図-10に示す。実験結果に比べて解析値は、 $Rs=1/100\text{rad}$ で84%、最大耐力時で60%といづれも解析値が小さい傾向がみられる。

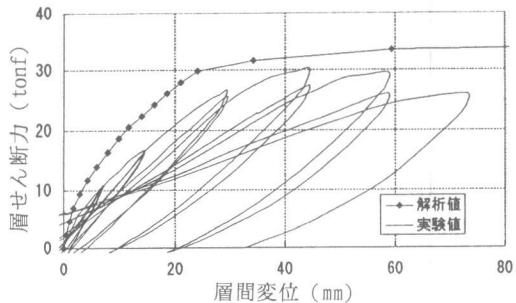


図-6 層せん断力－層間変位関係（OKJ3）

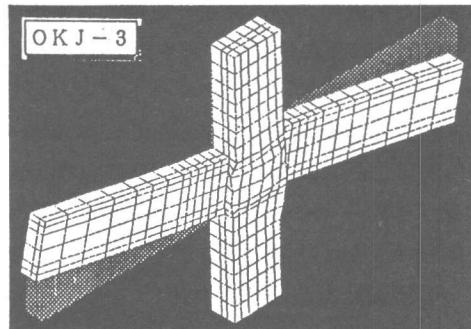


図-7 変形（OKJ3）

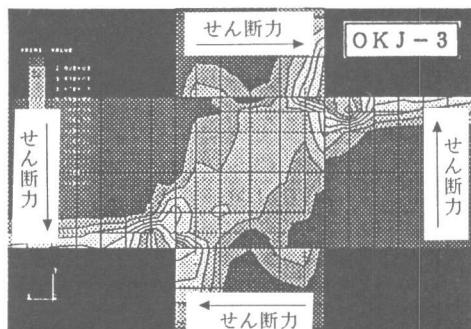


図-8 コンクリート圧縮応力センター（OKJ3）

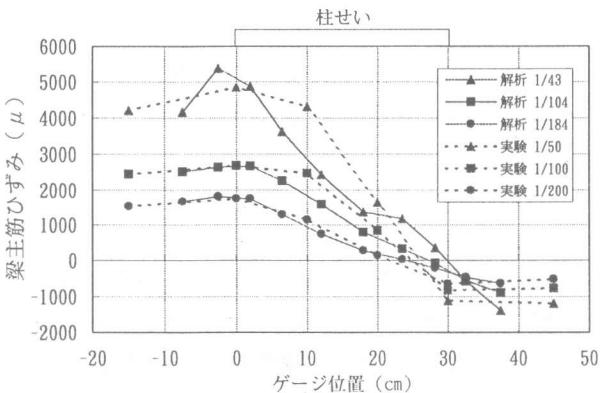


図-9 梁主筋ひずみ分布（OKJ3）

3. 2 立体接合部 I 2 [3]

3. 2. 1 履歴特性

立体接合部I2の層せん断力-層間部材角関係について、解析と実験の比較を図-11に示す。解析、実験とも層せん断力については、柱頭加力による軸力のP-δ効果を考慮した。平面接合部OKJ3の解析と同様、初期剛性は、実験値に比べ、解析値が高めの結果となった。最大層せん断力Psは、実験値のPs=40tonfに対し、解析値はPs=38.3tonfで、実験値より約4%程低い結果となった。学会の梁曲げ略算式から求めた梁曲げ降伏時層せん断力（Ps=40.7tonf）などから判断しても解析結果はかなり良好である。更に、解析では、最大層せん断力（Ps=38.3tonf）時に梁曲げ降伏が生じている。即ち、破壊モードも実験と同様、梁曲げ降伏先行型であると判断される。

3. 2. 2 変形と内部応力状況

図-12、13に、I2の最大層せん断力付近での変形とコンクリート応力コンターを示す。変形は、柱頭および両梁端の水平方向変位とそれに伴う梁曲げ変形が顕著である。応力コンター図では、接合部パネルの左上と右下を結ぶコンクリート斜め圧縮ストラットが形成されているのが明らかである。また、図-8の平面接合部OKJ3の応力状況と比較して、立体接合部I2では、接合部中央部に応力集中領域が形成されている。こ

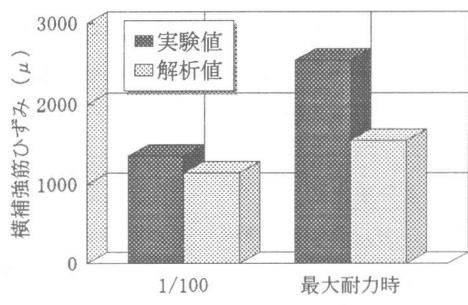


図-10 接合部横補強筋ひずみ（OKJ3）

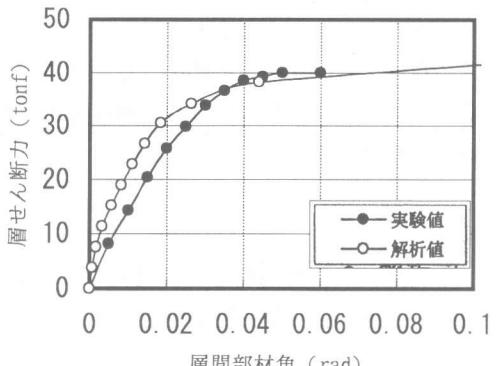


図-11 層せん断力-層間部材角関係（I2）

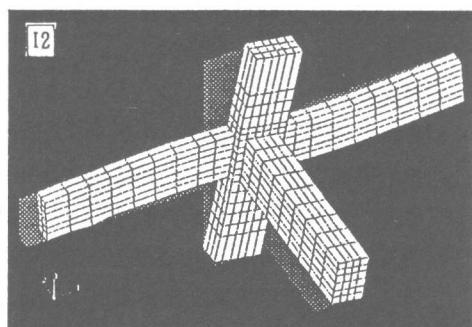


図-12 変形（I2）

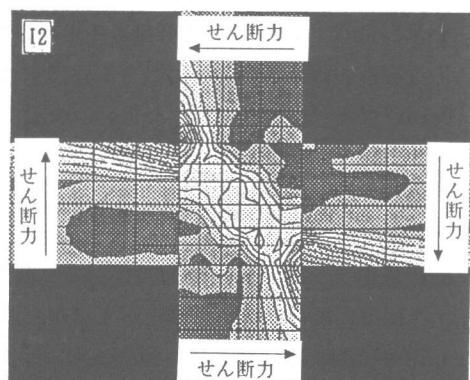


図-13 コンクリート圧縮応力コンター（I2）

れは、直交梁が取り付くことにより、接合部の直交方向拘束が生じたためであると考えられる。接合部中央部の応力集中領域の圧縮応力度は、 $431\sim524\text{kgf/cm}^2$ でコンクリート強度の約47%、その周辺領域の圧縮応力度は、 $338\sim431\text{kgf/cm}^2$ でコンクリート強度の約38%である。

4. まとめ

3次元非線形FEM解析プログラムを用いて、接合部せん断破壊先行型（J型）である平面接合部OKJ3試験体[2]と梁曲げ降伏先行型（B型）である直交梁付き立体柱・梁接合部I2試験体[3]の解析を行い、履歴特性、破壊モード、変形、鉄筋ひずみ、内部応力状況などの検討を行った。解析では梁危険断面での曲げひび割れの開口を考慮していないことから、剛性はやや剛めであったが、最大耐力については実験結果と良好な対応が得られた。

今後は、コンクリート強度、接合部横補強筋比、柱軸力比、床スラブの有無などのパラメータ解析などを行い、3次元解析の利点を生かした、定量的な接合部せん断抵抗機構の把握が必要であると思われる。

【謝 辞】

本研究は、文部省科学研究費補助金による総合研究（A）（課題番号：04302049、研究代表者：野口博）ならびに奨励研究（A）（課題番号：06750599、研究代表者：柏崎隆志）の研究である。

東京都立大学工学部建築学科 北山和宏 助教授と前東京大学大学院（博士課程） 李祥浩氏には、貴重な実験データを参考にさせて頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1]日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針、1990
- [2]柏崎隆志、野口博：超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集13-2、pp. 475-478、1991.6
- [3]李祥浩、北山和宏、小谷俊介、青山博之：高強度R C 造内柱・梁接合部のせん断強度：コンクリート工学年次論文報告集14-2、pp. 379-384、1992.6
- [4]雨宮篤、内田和弘、野口博：鉄筋コンクリート系部材の3次元有限要素解析（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造II、pp. 1061-1064、1992.8
- [5]米澤健次、野口博：有限要素法を用いた柱R C・梁Sの混合構造接合部のせん断耐力に関する解析的研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造II、pp. 1623-1626、1994.9
- [6]Fafitis, A. and Shar, S.P.:Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, ACI SP-87, pp. 213-232, 1985
- [7]Park, R., Priestley, M. J. N. and Gill, W. D.:Ductility of Square-Confining Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, pp. 929-950, April 1982
- [8]飯塚崇文、野口博：普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート部材の非線形有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集14-2、pp. 9-14、1992.6
- [9]柏崎隆志、野口博：超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断と付着に関する非線形有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集16-2、pp. 741-744、1994.6