

論文 有限要素法を用いた RC 内柱・梁接合部のせん断耐力に関するパラメータ解析

柏崎隆志*1・永井智之*2・野口博*3

要旨：コンクリート強度 σ_B 、接合部横補強筋比 p_w 、柱軸応力 σ_0 、梁主筋付着伝達をパラメータとして、鉄筋コンクリート造 (RC) 内柱・梁接合部の非線形有限要素 (FEM) 解析を行った。接合部せん断耐力に与える各パラメータの影響度を解析的に考察し、せん断抵抗機構の検討を行った。コンクリート強度の上昇は、せん断耐力の上昇に大きな影響を与えるが、その上昇分は、 σ_B に直接比例せず、 $\sqrt{\sigma_B}$ に比例する結果となった。また、横補強筋は、 $p_w=0.2\%$ 以上では、せん断耐力に対してあまり有効ではなかった。更に、柱軸力、梁主筋付着は、せん断抵抗機構の形成に対して、大きな影響を与えた。

キーワード：内柱・梁接合部、せん断耐力、パラメータ解析、有限要素法

1. はじめに

鉄筋コンクリート造 (RC) 建物の耐震設計の中で、柱・梁接合部については、これまで明確な設計規定はなく、設計者の経験的判断に基づき、慣用的に行われてきたが、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]において、接合部に対する明確な設計規定が設けられ、接合部の合理的な設計法が確立しつつある。しかしながら、適用材料強度の上限や接合部せん断耐力に対して、大きな影響を与えると考えられる、①コンクリート圧縮強度 σ_B 、②接合部横補強筋比 p_w 、③柱軸応力 σ_0 、④梁主筋付着伝達などについては、不明瞭な点も多く、また実験的研究だけでは、把握できない点など多い。

そこで、本研究では、より合理的な接合部設計法の確立のために、高強度材料を用いた RC 内柱・梁接合部を解析対象試験体とした 2 次元非線形有限要素 (FEM) 解析を行い、前述の影響因子が接合部のせん断耐力に与える影響を検討し、接合部せん断抵抗機構のモデル構築の基礎データを得ることを目的とした。

2. 解析方法

2. 1 解析対象試験体

解析対象試験体は、接合部せん断破壊先行型 (J 型) の高強度 RC 内柱・梁接合部 OKJ3 (コンクリート圧縮強度 $\sigma_B=1091 \text{ kgf/cm}^2$) [2]とした。また、コンクリート強度をパラメータとした解析では、同実験シリーズから OKJ1 ($\sigma_B=714 \text{ kgf/cm}^2$) と OKJ6 ($\sigma_B=546 \text{ kgf/cm}^2$) も解析対象とした。OKJ1、3、6 は、実大の約 1/3 スケールの直交梁、床スラブのない平面十字型内柱・梁接合部である。OKJ3 のコンクリート圧縮強度は $\sigma_B=1091 \text{ kgf/cm}^2$ 、梁主筋降伏応力度は $\sigma_y=7320 \text{ kgf/cm}^2$ である。接合部横補強筋比は、0.54% である。加力は、定軸力 85tonf 下で、両梁端に変位制御による正負繰り返し载荷を行った。表-1 に試験体諸

*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)

元と材料特性、図-1 に OKJ3 の配筋詳細を示す。

2. 2 解析モデル

FEM パラメータ解析は、普通強度材料から高強度材料まで適用可能な構成則モデルを組み込んだ 2 次元非線形 FEM 解析プログラム [3] を用いて行った。また、図-2 の要素分割図からもわかるように、点対称条件を用いて、試験体の 1/2 領域を解析対象領域とした。

加力は、実験に従い、柱頭に定軸力を与えた後、梁端部への変位増分法を用いた。更に、柱頭、柱脚および両梁端部の境界条件は実験に従った。以下に構成則モデルを示す。

コンクリート：要素内剛性を 6 節点および 8 節点で評価する平面応力要素とした。二軸応力下の構成則には、Darwin らの等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル [4] を用い、破壊条件は Kupfer らの研究 [5] に基づいた。圧縮応力-圧縮ひずみ関係の上昇域には、高強度コンクリートの特性を表すのに適した Fafitis-Shah モデル [6] を用い、ひずみ軟化域には Kent-Park モデル [7] を用い、横補強筋による拘束効果を考慮した。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減モデルには、飯塚、野口モデル [8] を用いた。

鉄筋：柱 1 段筋と梁主筋には 2 節点線材要素、柱中段筋と横補強筋は RC 積層要素で表現した。応力-ひずみ関係として柱・梁主筋にバイリニア型、横補強筋にトリリニア型のモデルを用いた。

付着：線材要素とコンクリート要素間の付着は、離散型ボンドリンク要素で表現した。また、RC 積層要素には、

表-1 試験体諸元と材料特性

試験体名		OKJ1	OKJ3	OKJ6
梁	上端主筋	9-D13	10-D13	8-D13
	下端主筋	7-D13	10-D13	7-D13
	スラップ	2-D6@50 $p_w=0.63$ (%)		
柱	主筋	20-D13	22-D13	20-D13
	フープ	2-D6@40 $p_w=0.53$ (%)		
接合部	フープ	4-D6×3 セット@20 $p_w=0.54$ (%)		
コンクリート	圧縮強度	強度時ひずみ	1/4 割線剛性	割裂強度
	F_c (kgf/cm ²)	(μ)	(10 ⁵ kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
600 (OKJ6)	546	2230	3.75	41.7
800 (OKJ1)	714	2960	3.58	43.4
1200 (OKJ3)	1091	2860	4.42	61.3
鉄筋	降伏応力度	降伏時ひずみ	最大応力度	ヤング係数
	(kgf/cm ²)	(μ)	(kgf/cm ²)	(10 ⁵ kgf/cm ²)
D13 (SD70)	7320	5870	7820	1.90
D6 (SD80)	9740	7340	11630	1.86

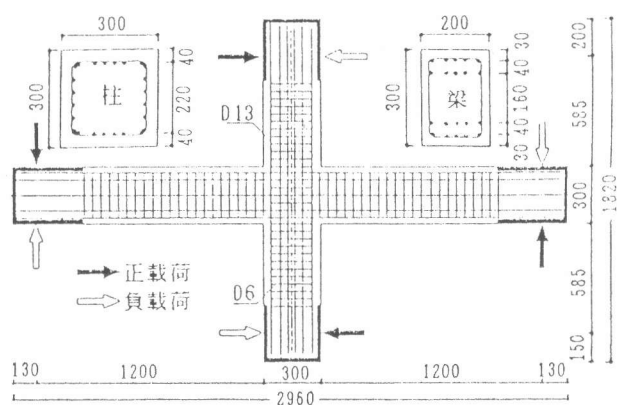


図-1 試験体配筋 (OKJ3)

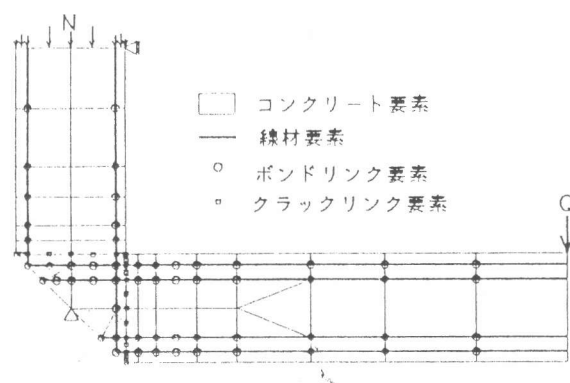


図-2 要素分割 (OKJ3)

テンションスティフニングモデルを用いて、付着作用を間接的に表現した。

ひび割れ：コンクリート要素内は分布型ひび割れモデル、曲げひび割れの開口が顕著な梁危険断面領域には、離散型ひび割れモデルを使用した。

尚、コンクリートや鉄筋、付着の材料特性は、実験結果に従った。

3. FEMパラメータ解析

RC 平面内柱・梁接合部のせん断耐力や変形性能に及ぼす各種パラメータの影響を把握するために、以下のようなパラメータ解析を行った。

3. 1 コンクリート強度

文献 [1] の接合部設計では、接合部せん断応力度をコンクリート圧縮強度 σ_B の 0.3 倍以下に抑えることを規定しているが、その適用は普通強度材料に限られている。そこで、高強度材料まで適用できる耐力式の検討を行うことを目的として、コンクリート強度をパラメータとした解析を行った。図-3 に、最大耐力時の接合部せん断応力度ーコンクリート圧縮強度関係を示す。尚、接合部せん断応力度の

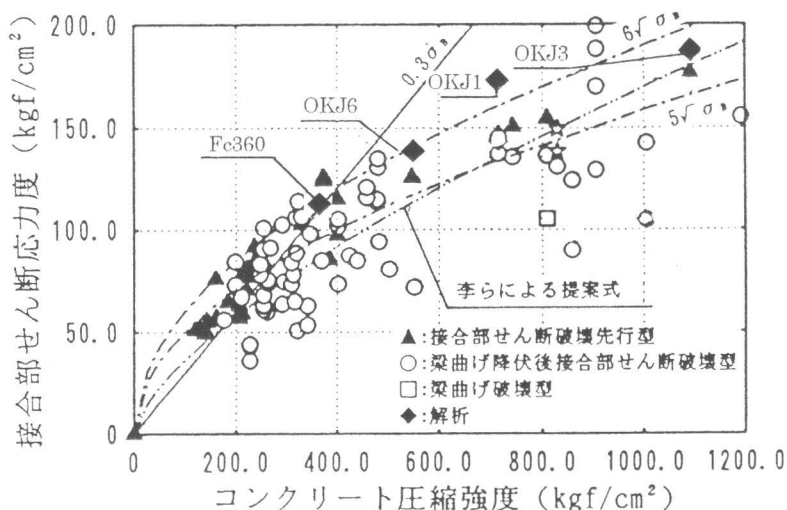


図-3 接合部せん断応力度ーコンクリート圧縮強度関係

解析値は、力の釣り合いを用いて、層せん断力から接合部せん断力を求め、それを文献 [1] で定義されている接合部有効断面積で除したものである。文献 [1] の接合部せん断耐力式 ($\tau_{ju}=0.3 \sigma_B$) は、高強度コンクリートではせん断耐力を過大評価している。解析でのせん断耐力は $6\sqrt{\sigma_B}$ の曲線に近い値を示した。コンクリート有効圧縮強度を考慮し、設計式として提案されている李らの式 [9] は、本解析結果よりやや低めの値を示した。

3. 2 接合部横補強筋

文献 [1] では、接合部横補強筋の役割を接合部のせん断耐力増大ではなく、じん性を確保し、変形能力を高める効果があるとしている。しかし、横補強筋の役割は不明で、その効果の解明から、より合理的な設計が行うことができる。そこで、接合部補強筋比をパラメータとした解析を行った。図-4 に最大耐力時の接合部せん断応力度ー接合部横補強筋比関係を示す。横補

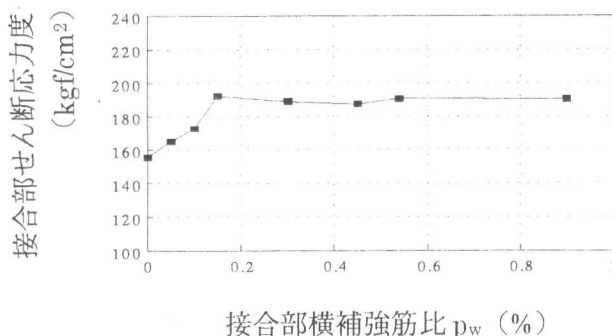


図-4 接合部せん断応力度ー横補強筋比関係

強筋比 $p_w=0.0\sim0.15\%$ までは、接合部せん断応力度の上昇がみられた。破壊モードは、 $p_w=0.0\sim0.54\%$ は J 型（接合部せん断破壊先行型）、 $p_w=0.9\%$ で BJ 型（梁曲げ降伏後接合部破壊型）に移行する。このことから、接合部のせん断耐力は、接合部補強筋が全くない場合より、 $p_w=0.20\%$ 程度配筋されていた方が高い値を示すが、それ以上の横補強筋比による接合部せん断耐力の上昇は、あまり期待できない。

3. 3 柱軸力

柱軸応力が増大すると圧縮ストラットの幅が拡大し、接合部横補強筋による拘束効果とコンクリートと鉄筋の付着力増大により、接合部せん断耐力が上昇すると考えられる。一方、圧縮ストラットの角度が急になるため、耐力低下の因子だとも言える。そこで、柱軸応力 σ_0 をパラメータとした解析を行った。図-5 に、層間部材角 $R_s=1/50$ rad. 時の接合部内圧縮応力コンターの状況を示す。柱、梁から入力されるせん断力によって、接合部内対角方向に斜め圧縮ストラットが形成されている。図-5 中の (a) と (b) は、それぞれ $\sigma_0=0.1\sigma_B$ (σ_B : コンクリート圧縮強度) と $0.3\sigma_B$ の時の圧縮応力コンターを示しているが、両図を比較すると、軸力が大きいとストラットの角度が急になり、幅も増大することが分かる。接合部のせん断耐力は、 $\sigma_0=0.1\sigma_B$ の場合と比較して、 $\sigma_0=0.2\sigma_B$ で 9% 程度、 $\sigma_0=0.3\sigma_B$ ので 7% 程度高い値を示した。

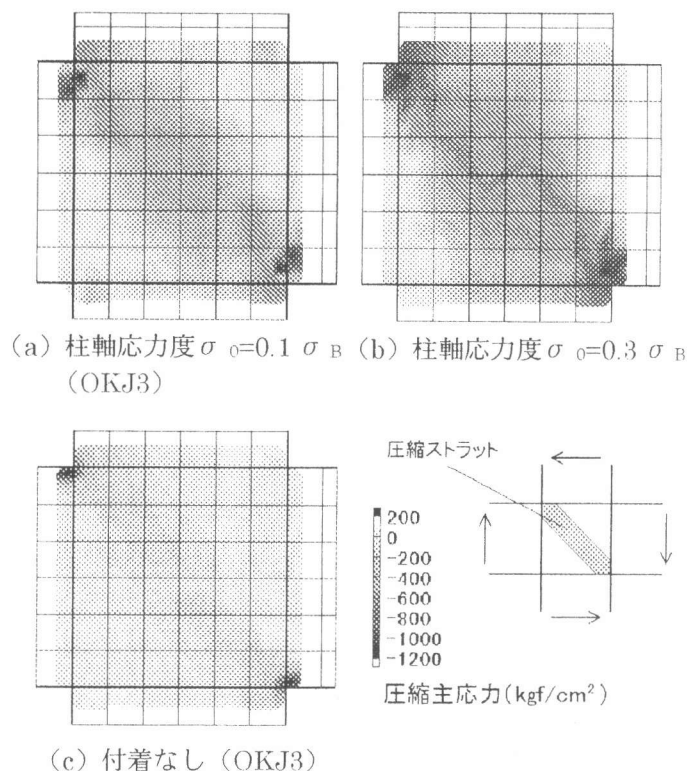


図-5 接合部内部応力コンター ($R_s=1/50$ rad.)

3. 4 梁主筋付着伝達

繰り返し载荷を受ける接合部では、接合部内に通し配筋される梁主筋の付着劣化が進行し、接合部せん断耐力が劣化することが考えられる。既往の研究 [3] [10] では、接合部のせん断耐力と付着との関係について、検討が行われているが、梁側主筋の付着劣化を考慮していない、付着劣化によって生じる接合部あるいは梁の破壊モードの変化を考慮していないなど、接合部における梁主筋

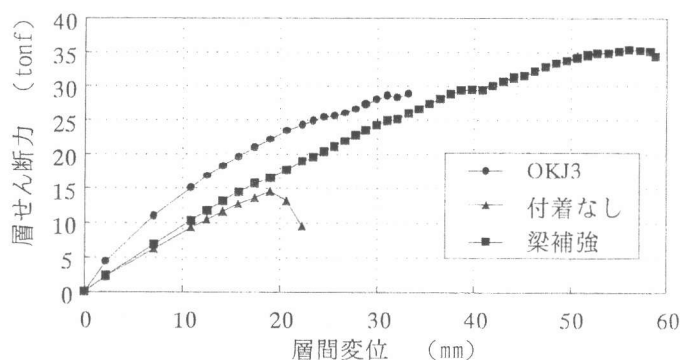


図-6 層せん断力-層間変位関係

の付着伝達とせん断耐力の関係については、不明瞭な点が多い。そこで、繰り返し载荷の影響で付着劣化が考えられる領域（接合部パネルと危険断面から D（梁せい）の梁領域）の付着伝達をなくした解析を行った。図-6 に層せん断力-層間変位関係を、図-7 に層間部材角 $R_s=1/50$ rad. 時の変形、ひび割れ状況を示す。付着劣化を考慮した解析では、梁曲げ圧縮域の圧壊により耐力に達したので、接合部せん断耐力を把握するために梁曲げ圧壊部分を補強して解析を行った結果、圧壊が抑えられ、付着が健全な解析（OKJ3）と比較して耐力が約 35% 上昇している。これは、図-7 からわかるように、梁主筋の付着力の伝達がないため、接合部内のせん断ひび割れの進展、開口が抑えられたためと考えられる。更に、図-5（a）と（c）の比較から、梁主筋の付着力が、圧縮ストラット形成に影響を与えることが分かる。

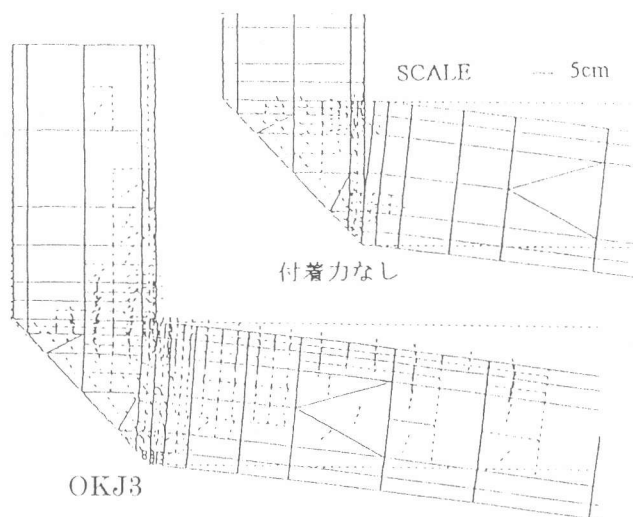


図-7 変形とひび割れ ($R_s=1/50$ rad.)

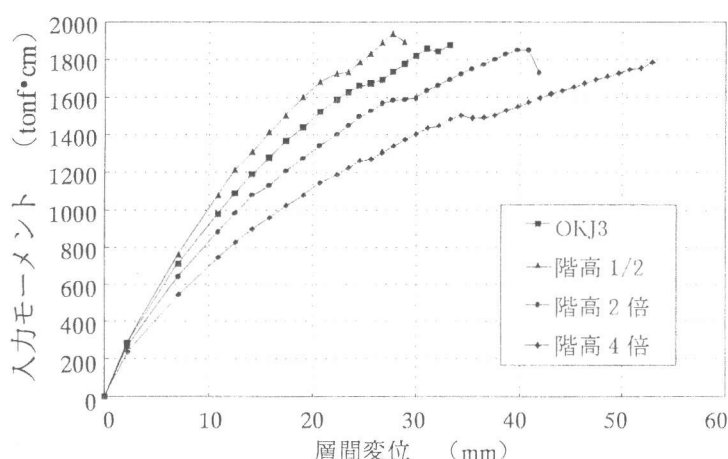


図-8 入力モーメント-層間変位関係

3. 5 階高

従来、接合部せん断破壊時の接合部せん断力は、一定であるとしているが、岡、塩原は、FEM 解析から柱の反曲点長さ（階高）により、層せん断力に変化し、梁から接合部に入力されるモーメントの和が一定であると報告した [10]。そこで、層せん断力の影響を検討するために、階高をパラメータとした解析を行った。図-8 に梁端からの入力モーメント-層間変位関係を示す。階高が 2 倍になると、層せん断力は 1/2 になる。階高 1/2 では、柱の破壊により最大耐力に達したため、柱の耐力を上げて再解析を行った。その結果、層せん断力は、通常の解析と比較して 2 倍に上昇した。梁端から接合部に入力されるモーメントは、ほぼ同じ値を示した。

4. まとめ

1. 高強度コンクリートを用いた内柱・梁接合部のせん断耐力は、ほぼ $6\sqrt{\sigma_B}$ 程度となった。また、設計式として提案されている李らの提案式 [9] は、本解析結果の下限を示した。

2. 接合部横補強筋は、横補強筋比 $p_w=0.20\%$ 程度まで、接合部せん断耐力の上昇に寄与するが、それ以上の接合部補強筋比による、接合部せん断耐力の上昇はみられなかった。
3. 柱軸応力が、 $\sigma_0=0.1\sigma_B$ から $0.2\sigma_B$ 、 $0.3\sigma_B$ とすると、接合部せん断抵抗機構の形成に変化が生じるが、接合部せん断耐力には、あまり影響を与えない。
4. 梁主筋付着が劣化した場合、接合部せん断ひび割れの進展、開口が生じないため、接合部自体のせん断耐力の劣化はみられなかった。
5. 階高によって、層せん断力が増加するが、梁端から接合部に入力されるモーメントは、ほぼ同じ値を示した。

【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：千葉大学 野口博）の一部である。総合研究（A）の研究分担者からは、数多くの貴重なご助言を頂きました。ここに、厚くお礼申し上げます。

【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年11月
- [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、第13巻、第2号、pp.475～478、1991年6月
- [3] 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、第16巻、第2号、pp.741～744、1994年6月
- [4] Darwin, D. and Pecnold, D. A. : Nonlinear Biaxial Stress - Strain Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 13, No. EM2, pp.229～241, April 1977
- [5] Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. : Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No. EM4, pp.853～866, August 1973
- [6] Fafitis, A. and Shah, S. P. : Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns, ACI, SP - 87, pp.213～232, 1985
- [7] Kent, D. C. and Park, R. : Flexural Members with Confined Concrete, Journal of the Structural Division, Proceeding of the ASCE, ST7, pp.1969～1990, July 1971
- [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、第14巻、第2号、pp.9～14、1992年6月
- [9] 李祥浩、北山和宏、小谷俊介、青山博之：高強度 RC 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、第14巻、第2号、pp.379～384、1992年6月
- [10] 岡功治、塩原等：鉄筋コンクリートはり柱接合部の架構において梁通し主筋の付着強度が最大層せん断力に及ぼす影響（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、構造Ⅳ、pp.131～134、1995年8月