

論文 RC 内柱・梁接合部のせん断耐力に与える横補強筋の効果に関する有限要素法解析

柏崎隆志*1・野口 博*2

要旨：鉄筋コンクリート内柱・梁接合部のせん断耐力に与える接合部横補強筋の効果を検討するため、普通強度から高強度コンクリートまでを対象として、横補強筋量をパラメータとした 2 次元非線形有限要素法解析を行った。横補強筋量の増加に伴う接合部せん断耐力上昇は、普通強度コンクリートの方が顕著で、高強度コンクリートの場合は最大耐力時に横補強筋の降伏が生じないために頭打ちの傾向がみられた。更に、解析から得られた接合部せん断ひび割れ発生後のせん断変形、対角ひずみの考察から、せん断耐力が一定となる横補強筋量は、対角引張ひずみに大きな影響を受けることがわかった。

キーワード：柱・梁接合部、せん断耐力、横補強筋、有限要素法、パラメータ解析

1. はじめに

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・同解説』[1]（学会指針）において、鉄筋コンクリート（RC）柱・梁接合部の耐震設計規定が初めて設けられ、接合部の合理的な設計法が確立しつつある。しかし、その適用範囲が普通強度材料に限定され、また接合部横補強筋、直交梁の有無や 2 方向地震力入力など、接合部せん断耐力に大きな影響を及ぼす因子について、未だ不明な点が残されている。このうちの接合部横補強筋の役割について、学会指針では、接合部せん断耐力の増大ではなく、靱性を確保し、変形能力を高める効果があるとしている。しかしながら、接合部横補強筋の効果については不明な点が多く、その効果の解明によってより合理的な接合部設計を行うことができる。

そこで、本研究では、普通強度から高強度コンクリートまでを用いた RC 内柱・梁接合部の 2 次元非線形有限要素法（FEM）解析を行い、コンクリート圧縮強度と接合部横補強筋量を変数としたパラメータ解析結果から、接合部横補強筋量の違いによる接合部のせん断変形性状の相違について検討を行い、更に接合部せん断耐力に与える横補強筋の効果を解明す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、接合部せん断破壊が顕著であった、実大構造物の約 1/3 スケールの平面十字型内柱・梁接合部試験体の OKJ1、OKJ3、OKJ6 [2] の 3 体とした。OKJ1、OKJ3、OKJ6 には、Fc600 以上の高強度コンクリートが用いられた。更に、普通強度コンクリートを想定した仮想試験体として、文献 2 と同様の試験体形状を持つ Fc240 と Fc360 の 2 体を追加し、計 5 体の FEM 解析を行った。

*1：千葉大学助手 工学部建築学科、工修（正会員）

*2：千葉大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

表-1 材料特性

コンクリート 設計強度 Fc	圧縮強度 (kgf/cm ²)	強度時 ひずみ (μ)	割裂 強度 (kgf/cm ²)	1/4 割線剛性 (kgf/cm ²)	接合部横補強筋			
					降伏応力度 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	
Fe240	240	2019	24.0	230000	SD295	3000	1610	1860000
Fe360	360	2183	36.0	257000	SD345	3500	1610	1860000
Fe600	546	2230	41.7	375000	SD785	9740	7340	1860000
Fe800	714	2960	43.4	358000		9740	7340	1860000
Fe1000	1091	2860	61.3	442000		9740	7340	1860000

各試験体の材料特性を表-1に、試験体配筋詳細の一例として、Fe1000のOKJ3試験体の配筋図を図-1に示す。接合部横補強筋には、コンクリート強度を考慮し、OKJ1、OKJ3、OKJ6には高強度鉄筋(SD785)を、Fe240、Fe360には普通強度鉄筋(SD295、SD345)を使用した。OKJ1、OKJ3、OKJ6の実験時の加力は、柱頭に一定軸力を加えた後、両端梁に変位制御による正負繰り返しの逆対称加力が行われた。

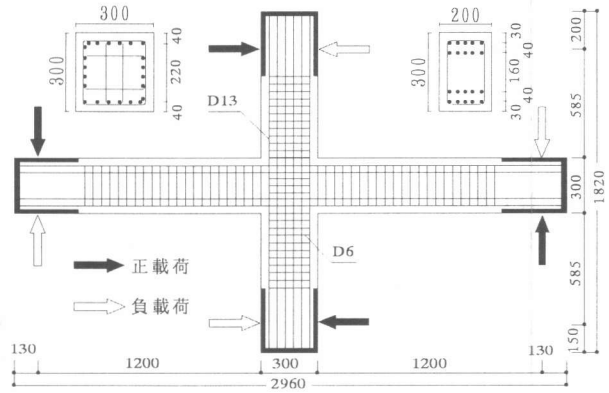


図-1 試験体配筋図

2.2 解析モデル

本パラメータ解析は、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、試験体の要素分割は、点対称条件を用いて、図-1の十字型試験体の1/2領域を解析対象領域とした(図-2参照)。加力は、実験時の境界条件に従い、柱頭に一定軸力を与えた後、梁端部への変位増分法による単調載荷を行った。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。

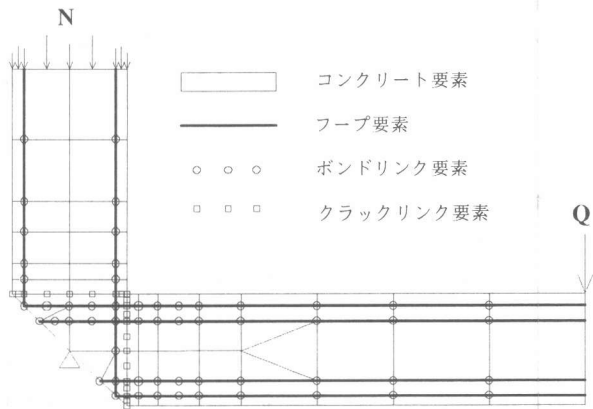


図-2 要素分割図

以下に構成則モデルの概要を示す。また、引用文献を文献3に示す。

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を用い、破壊条件はKupfer らの研究に基づいた。圧縮応力-圧縮ひずみ関係の上昇域には、普通強度コンクリートにはSaenzモデル、高強度コンクリートにはFafitis-Shahモデルを用いた。圧縮強度以降のひずみ軟化域にはKent-Parkモデルにより負勾配を求め、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：梁主筋などの線材要素とコンクリート要素間の付着は、鉄筋軸方向とダボ方向に剛性が与えられる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、テンションスチーピングモデルを用いて、ひび割れ発生後の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を用いた。そのほか、梁危険断面には、顕著な曲げひび割れの開口を表現するために、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、実験データから求めた。

2. 3 解析パラメータ

本解析では、接合部せん断耐力に影響を与えるコンクリート圧縮強度と接合部横補強筋比の影響を検討するため、コンクリート強度 $\sigma_B = 240, 360, 546, 714, 1091 \text{ kgf/cm}^2$ のそれぞれについて、接合部横補強筋比 ($p_w = 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0\%$) を変数としたパラメータ解析を行った。

各パラメータ解析では、コンクリート強度、横補強筋比の組み合わせに応じて、コンクリートモデルのひずみ軟化域 (Kent-Parkモデル)、付着モデルの剛性と強度などを変えた。

3. 解析結果

3. 1 履歴特性

図-3に、本FEM解析の層せん断力-層間変位関係の一例として、コンクリート強度がFc600試験体の実験と解析結果の比較を示す。解析の初期剛性は、横補強筋比に関わらずほぼ一定値を示した。また、実験とほぼ同程度の横補強筋比を有する $p_w=0.4\%$ の解析結果は、実験時の最大耐力と比較して、5%低い最大耐力を示したが、文献4の解析結果も含めて、本解析モデルにより、接合部せん断耐力を精度良く、追跡できると考えられる。

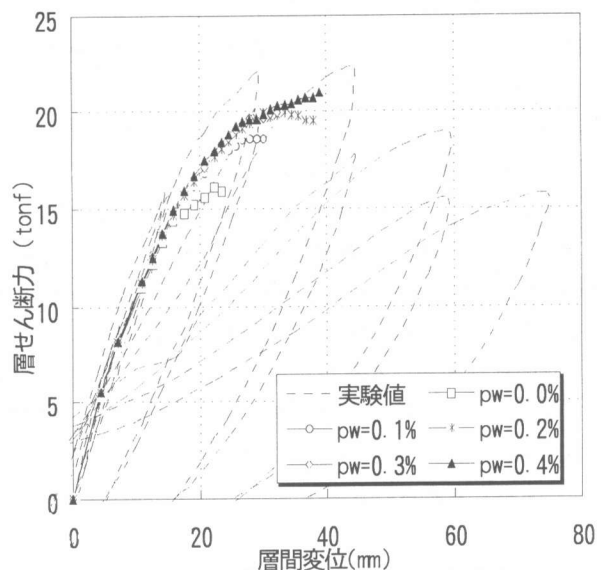


図-3 層せん断力-層間変位関係

更に、実験、解析とも破壊モードは、接合部せん断破壊型となり、梁曲げ降伏は生じていない。

その他の Fc240 と Fc360 試験体は、 $p_w=0.3\%$ 程度の接合部せん断耐力は、学会指針で提案されている接合部せん断耐力である $0.3\sigma_B$ 程度となり、破壊モードは接合部せん断破壊先行型で、最大耐力時には接合部横補強筋の降伏が確認された。Fc800 と Fc1000 の試

験体についても、文献 4 および本解析にて、実験結果と解析モデルの検証を行った。この 2 体の破壊モードは、接合部破壊先行型で普通強度の試験体とは異なり、最大耐力時には、横補強筋の降伏はみられなかった。

3. 2 せん断耐力上昇率

接合部せん断耐力と横補強筋量 $p_w \cdot \sigma_y$ の (σ_y : 横補強筋降伏応力度) 関係を検討するため、図-4 に、接合部せん断耐力上昇率 I_k - 接合部横補強筋量 $p_w \cdot \sigma_y$ 関係を示す。縦軸のせん断耐力上昇率は、解析から得られる各コンクリート強度毎の $p_w \cdot \sigma_y=0.0$ の最大耐力を 1 として、横補強筋量の増大に伴うせん断耐力の上昇を表したものである。また、既往の実験結果に基づき、上村により提案されているせん断耐力式 [5] と $p_w \cdot \sigma_y$ をパラメータとした最近の実験結果 [1] を比較のために図中に示す。

普通強度コンクリートの場合、 $p_w \cdot \sigma_y$ の増大に伴うせん断耐力上昇は著しく、 $p_w \cdot \sigma_y=35$ では、Fc240 が $I_k=1.5$ 、Fc360 が $I_k=1.35$ となった。また、Fc240 と比較して、Fc360 の方が耐力上昇率が低く、上村式と同様の傾向となった。これに対し、高強度コンクリートの場合、 $p_w \cdot \sigma_y=15 \sim 30$ でせん断耐力上昇率が頭打ちとなり、 $p_w \cdot \sigma_y=30$ 以降では、ほとんど耐力上昇はみられない。 I_k については、 $I_k=1.2 \sim 1.3$ となり、普通強度コンクリートの場合より、 I_k は小さい結果となった。これは、最大耐力時の横補強筋ひずみが、普通強度コンクリートの場合降伏まで達するが、高強度コンクリートの場合には、高強度横補強筋の降伏ひずみが大きいために降伏せず、有効に働いていないことによると考えられる。

3. 3 接合部せん断変形と対角ひずみ

前述の 3.2 せん断耐力上昇率をせん断抵抗機構に基づいて検討するため、図-5 に示す接合部中央部分のコンクリート要素(黒

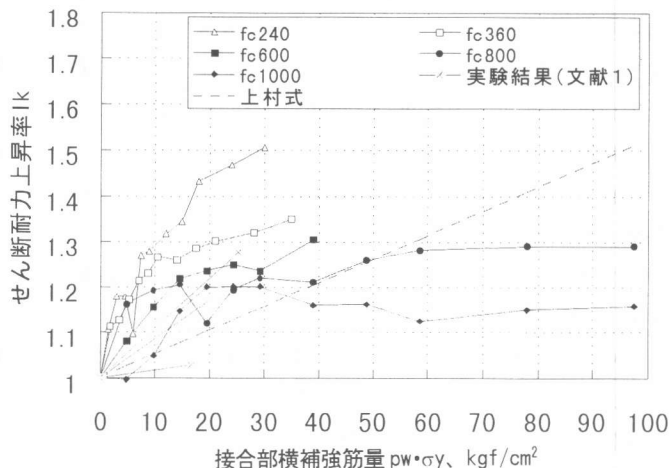


図-4 接合部せん断耐力上昇率-横補強筋量関係

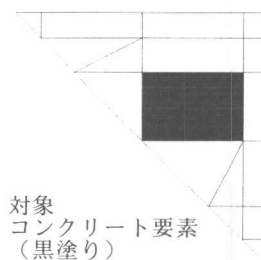


図-5 接合部要素分割

塗り)について、対角方向の圧縮、引張ひずみ状況および変形について考察する。図-5で取り出したコンクリート要素の接合部せん断ひび割れ前とひび割れ後の対角方向ひずみ状況をそれぞれ図-6、7に示す。更に、Fc240とFc600のそれぞれについて、 $p_w=0.2$ 、 0.6% のひび割れ発生前後の変形状況を図-8に示す。

図-6のひび割れ発生前では弾性状態での接合部コンクリート特性、図-7のひび割れ発生後では接合部コンクリートと接合部横補強筋の特性が対角ひずみに大きな影響を与えられられる。

図-6のひび割れ発生前では、図-8の変形からも分かるようにコンクリート強度に関係なく、 $p_w \cdot \sigma_y = 10$ 以下でせん断変形による対角圧縮ひずみが生じている。これに対して、 $p_w \cdot \sigma_y = 10$ 以上では、圧縮ひずみが引張ひずみへと移行している。

引張ひずみに移行する一因として、対象としたコンクリート要素が接合部中央部に位置し、梁主筋から伝達される付着力により、引張力が卓越するためであると考えられる。梁付け根圧縮部の接合部コンクリート要素では、圧縮ひずみが生じているのが解析結果から確認されている。更に、補強の程度により接合部コンクリートの内部応力状態が異なるためと思われる。図-7のひび割れ発生後においても、特に高強度コンクリートの場合、横補強筋量が少なくても対角圧縮ひずみが圧縮から引張に移行する傾向がみられる。

また、普通強度、高強度コンクリートとも、対角引張ひずみは $p_w \cdot \sigma_y$ が増加するにつれて、

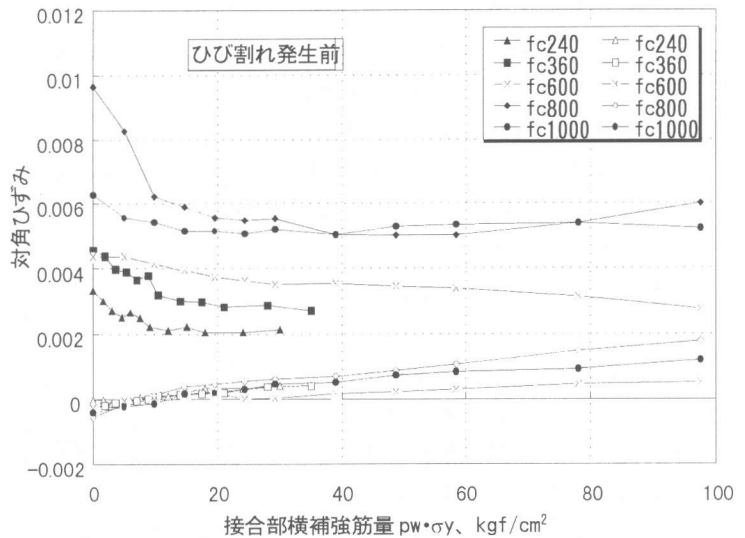


図-6 対角ひずみ-接合部横補強筋量関係 (ひび割れ発生前)

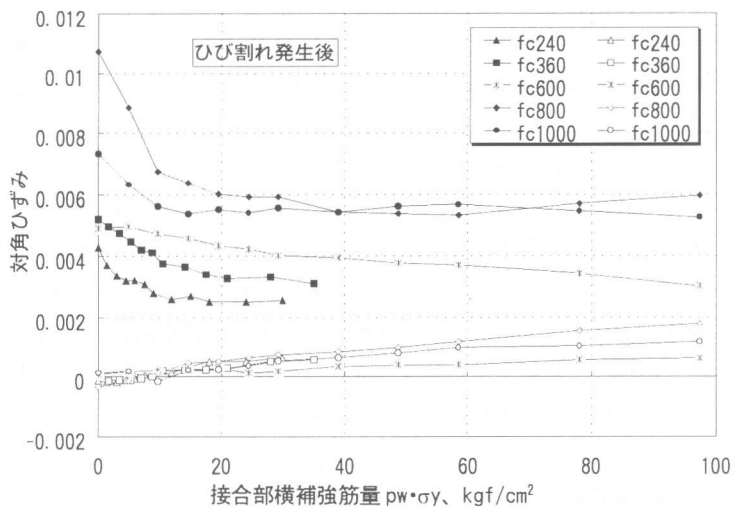


図-7 対角ひずみ-接合部横補強筋量関係 (ひび割れ発生後)

一定になる傾向を示すが、高強度コンクリートの方が横補強筋量の少ない段階から、早くこの傾向がみられる。これらの傾向は、接合部せん断ひび割れ発生前後に生じている傾向ではあるが、せん断ひび割れ発生後の前述の傾向が、塑性化の始まった接合部コンクリートと横補強筋の特性を表すものであるとするならば、図-4にみられるように、高強度コンクリートの方が、普通強度コンクリートに比べて、少横補強筋量で接合部せん断耐力上昇率が頭打ちになる傾向と一致すると考えられる。すなわち、せん断耐力上昇率が一定となる時の $p_w \cdot \sigma_y$ と対角引張ひずみが一定となる時の $p_w \cdot \sigma_y$ が一致していると考えられる。

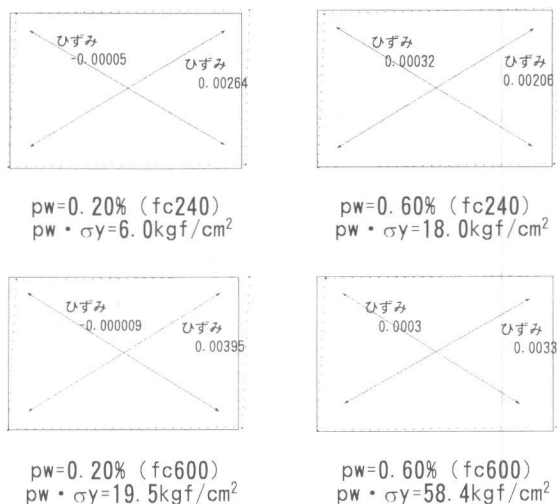


図-8 接合部コンクリート要素の変形

4. まとめ

普通強度から高強度コンクリートに適用可能な構成則モデルを用いて、RC内柱・梁接合部の2次元非線形有限要素解析を行った。解析モデルの検証を行った後、コンクリート強度と接合部横補強筋量を変数としたパラメータ解析により、接合部せん断耐力について検討を行った。

接合部せん断ひび割れ発生後の変形と対角ひずみの検討から、接合部せん断耐力上昇率が一定となる時の $p_w \cdot \sigma_y$ と対角引張ひずみが一定となる時の $p_w \cdot \sigma_y$ は一致し、高強度コンクリートの方が普通強度コンクリートに比べて、低横補強筋量でせん断耐力上昇率が頭打ちとなった。

また、普通強度コンクリートよりも高強度コンクリートのせん断耐力上昇率が低いのは、普通強度コンクリートの場合、最大耐力時に接合部横補強筋が降伏するのに対して、高強度コンクリートの場合、高強度横補強筋の降伏ひずみが大きいことから、最大耐力時に実験、解析とも横補強筋の降伏がみられないためと考えられる。

【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、永井智之、野口博：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、コンクリート工学年次論文報告集、第18巻、第2号、pp.941～946、1996年7月
- [4] 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15巻、第2号、pp.17～20、1993年6月
- [5] 上村智彦：鉄筋コンクリート構造物の梁・柱接合部の終局せん断強度について、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、pp.1155～1156、1975年10月