

論文

[2123] 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

柏崎隆志*1・野口 博*2

1. はじめに

大きな地震力を繰り返し受ける鉄筋コンクリート(RC)架構では、接合部内梁通し筋の付着劣化が進行し、更に接合部せん断強度の劣化が考えられる。しかし、付着とせん断の相互作用について、解析的に検討した例は少ない。本研究では、高強度材料を用いた内柱・梁接合部実験[1]の中から、接合部せん断破壊が顕著なOKJ3を解析対象試験体として選び、接合部内梁通し筋の付着をパラメータとした2次元非線形有限要素解析(FEM解析)を行い、付着とせん断強度、破壊モード等の関係について検討する。

2. 解析方法

2.1 解析対象試験体

本解析では、接合部梁通し筋の付着とせん断強度の関係を明確に把握するため、解析対象試験体を接合部せん断破壊先行型のOKJ3試験体[1]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、スパンは270cmである。柱、梁の断面は、30cm×30cm、20cm×30cmである。材料は、コンクリート強度が1091kgf/cm²、梁主筋降伏応力度が7320kgf/cm²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の逆対称加力が行われている。試験体諸元と材料特性を表-1、試験体配筋図を図-1に示す。本解析では、図-2の要素分割に示すように、接合部梁通し筋の付着をパラメータとして、CASE1~3の解析を行った。

表-1 試験体諸元と材料特性

試験体名		OKJ3	
梁	主筋	10-D13	
	スタップ [®]	2-D6@50 P _w =0.63(%)	
柱	主筋	22-D13	
	フ [®]	2-D6@40 P _w =0.53(%)	
接合部	フ [®]	4-D6×3セット@50 P _w =0.54(%)	
	横補強法	外周部+中子筋	
コンクリートF _c		1200	
梁降伏時接合部せん断応力度τ _{ry} (kgf/cm ²)		154.4 =5.6√F _c =0.16F _c	
梁主筋付着指標μ		8.8	
コンクリートF _c		1200	
圧縮強度 (kgf/cm ²)		1091	
強度時ひずみ (μ)		2860	
1/4 F _c 割線剛性 (×10 ⁶ kgf/cm ²)		4.42	
割裂強度 (kgf/cm ²)		61.3	
鉄筋		D6(SD80)	D13(SD70)
降伏応力度 (kgf/cm ²)		9740	7320
降伏時ひずみ (μ)		7340	5870
最大応力度 (kgf/cm ²)		11630	7820
ヤング係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)		1.86	1.90

CASE1:接合部全域に付着を与えた場合(OKJ3B)

OKJ3B解析では、接合部内全域にボンドリンクを配し、コンクリートと鉄筋との間に付着を持たせ、実験時の付着状況を再現したものである。

CASE2:接合部圧縮域に付着を与えた場合(OKJ3BC)

OKJ3BC解析では、接合部のコンクリート圧縮ストラット領域だけにボンドリンクを配し、梁主筋付着力を負担させた解析である。

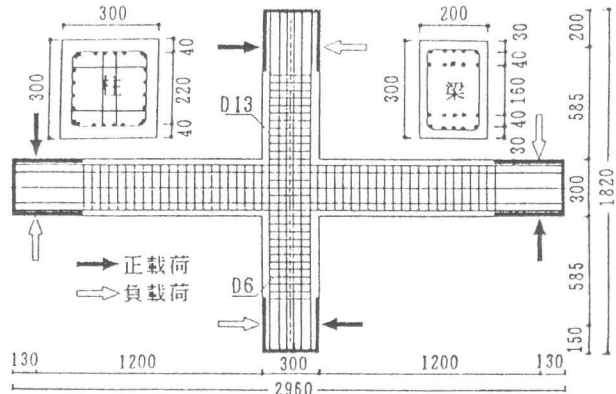


図-1 試験体配筋図

*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)

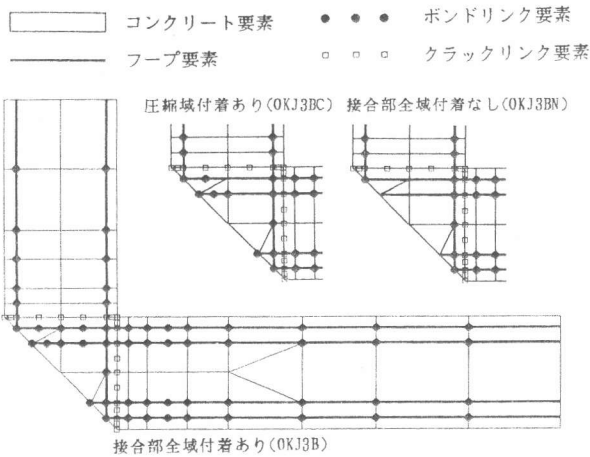


図-2 要素分割図

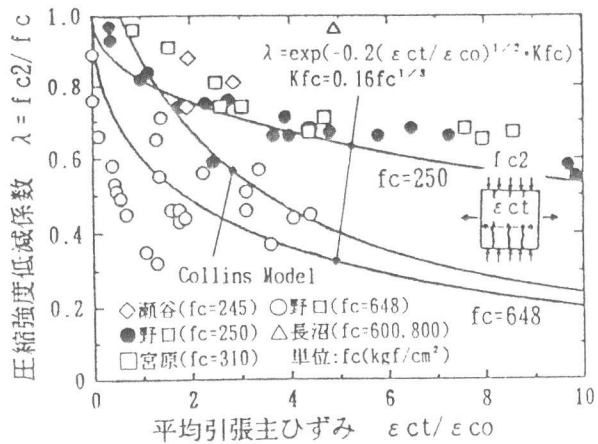


図-3 飯塚、野口による圧縮強度低減モデル[4]

CASE3: 接合部全域の付着を除去した場合(OKJ3BN)

OKJ3BN解析では、接合部内梁通し筋の付着を全てなくして、梁主筋付着力を反対側の梁曲げ圧縮領域に負担させた解析である。

2. 2 解析モデル

本解析では、2次元非線形有限要素解析プログラム[2][3]のコンクリート圧縮強度低減モデルを図-3の飯塚、野口モデル[4]に修正したプログラムを使用する。

要素分割は、図-2に示すように点対称条件を用いている。境界条件は実験に従う。以下に平面応力状態の解析モデルの概要を示す。**コンクリート**：

コンクリートは、要素内剛性の評価を内部積分点で行う6節点および8節点平面応力要素で表現する。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らの研究に基づく。圧縮応力-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Fafitis-Shahモデルを用い、拘束コンクリートのひずみ軟化域は、Kent-Parkモデルを使用する(図-4参照)。**鉄筋**：柱一段筋と梁主筋を2節点線材要素で、また柱中段筋と横補強筋をRC積層要素で表現する。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使用する。**付着**：柱、梁主筋とコンクリートの付着は、離散型ボンドリンク要素で表現する。**ひび割れ**：コンクリート要素およびRC積層要素内のひび割れは分布型ひびわれモデルを使用する。曲げひびわれの開口が顕著な梁危険断面領域は離散型ひびわれモデルを使用する。コンクリートと鉄筋の材料定数は、実験時の材料試験結果を用いている。表-2に示すボンドリンク定数は、梁主筋ひずみ測定区間の平均付着応力度とコンクリートひずみを無視した鉄筋ひずみの積分値をすべり量として決定した。

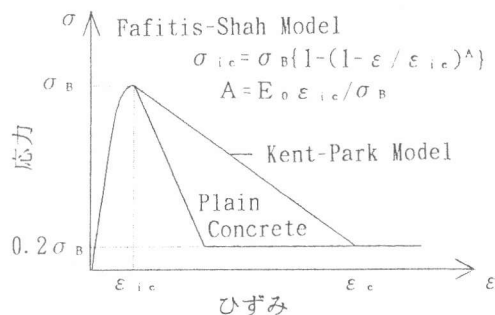


図-4 圧縮応力-ひずみ関係

表-2 ボンドリンク材料定数

	弾性剛性 (kgf/cm ²)	第2剛性 (kgf/cm ²)	折点付着応力 (kgf/cm ²)	付着強度 (kgf/cm ²)
接合部かぶり (引張側)	10000	750	40	50
接合部 コア	15000	1000	140	220
接合部かぶり (圧縮側)	20000	1200	250	500

3. 解析結果

3. 1 履歴特性

図-5に、各解析の層せん断力-層間変位関係を示す。実験時の梁主筋付着状況を模擬したOKJ3Bでは、層間部材角Rs=1/200rad.程度までの初期剛性、並びに最大耐力(Ps=29.9tonf)は、実験との対応も良好で、本解析モデルによって実験結果が検証できたと考えられる。接合部圧縮ストラッ

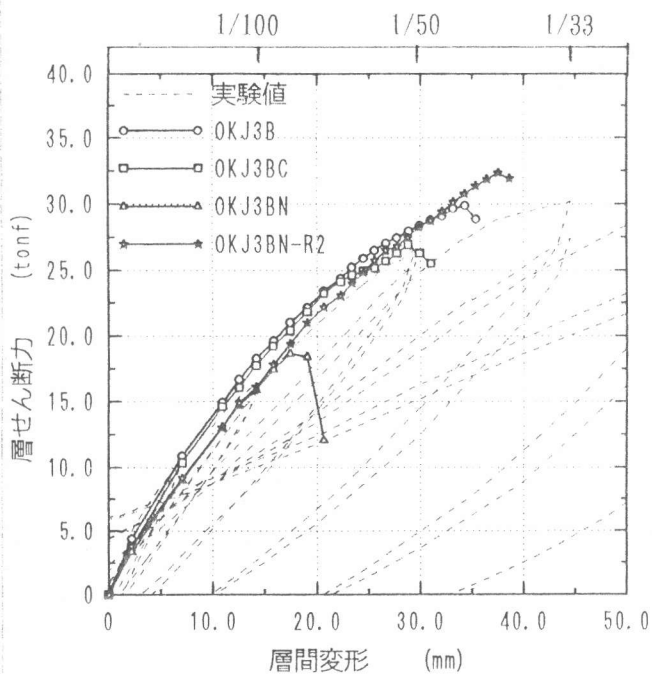


図-5 層せん断力-層間変位関係

ト領域だけ付着を与えたOKJ3BCでは、OKJ3Bとほぼ同じ初期剛性となった。Rs=1/50rad. 付近で耐力(Ps=26.9tonf)に達し、OKJ3Bの耐力と比較して10%の耐力低下が生じた。OKJ3BNでは、接合部内の梁主筋付着を全てなくした結果、梁曲げ圧縮領域の破壊が先行し、接合部せん断強度に達することなく、Rs=1/100rad. 程度で最大耐力(Ps=17.4tonf)となった。破壊モードは梁曲げ圧壊である。そこで、接合部せん断強度を明確に把握するために、OKJ3BNについて、梁かぶりコンクリートの強度を2倍に補強し、再解析を行った(OKJ3BN-R2解析)。OKJ3BN-R2では、無補強のOKJ3BNと同じ初期剛性となり、耐力は早期の梁曲げ圧壊が防止されたことにより、Ps=32.3tonfまで上昇した。

3. 2 変形および主応力

OKJ3Bの最大耐力時の変形と主応力の流れを図-6に示す。更に比較のために実験時のひび割れ図とRs=1/200rad. の主応力図を図中に示す。変形は、梁危険断面で、曲げひび割れの開口が顕著である。また、圧縮側かぶりコンクリートに圧壊が生じ、接合部内のせん断ひび割れが顕著となっている。解析の耐力時には、接合部下部にコンクリートの圧壊が発生している。圧縮主応力は、Rs=1/200rad. で接合部パネル全域に渡って幅広く伝達されているのに対し、Rs=1/100rad. 以降から、接合部圧縮ストラットを介して集中的に伝達されている。即ち、柱、梁の曲げ圧縮域から接合部へと流れる応力伝達機構が明確で、特にせん断力の増大に伴って、接合部コンクリート圧縮ストラットの応力状態が厳しくなっている。

3. 3 梁主筋ひずみ

OKJ3B、OKJ3BN-R2の梁主筋ひずみ分布を図-7に示す。OKJ3Bは、Rs=1/100rad. まで実験との対応が良好である。また、Rs=1/50rad. では、解析の引張ひずみが実験よりも小さい結果となった。接合部内圧縮側鉄筋の引張転化現象はみられず、実験、解析ともに良好な付着性状を示している。一方、OKJ3BN-R2は、接合部内梁主筋の付着がないため、圧縮、引張側のひずみ勾配はみられない。

3. 4 接合部内有効圧縮強度

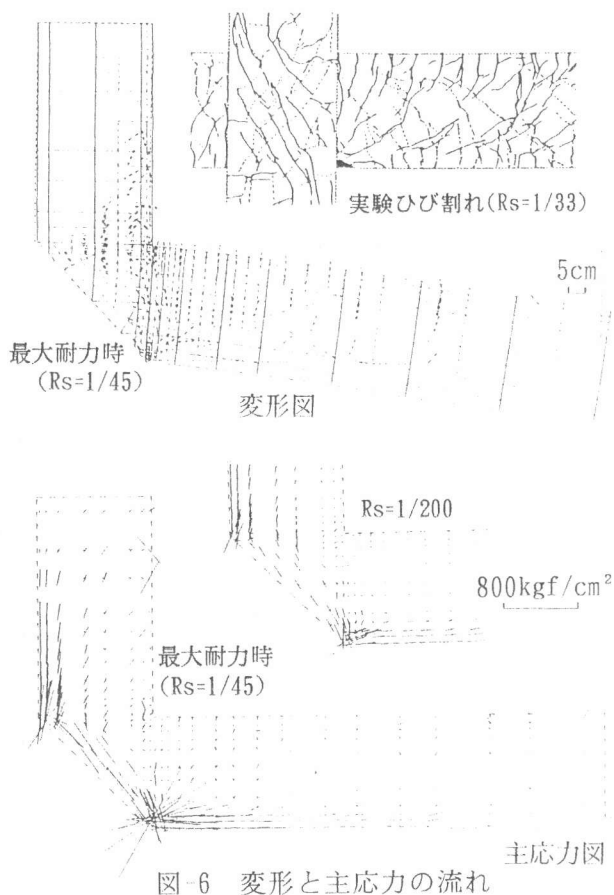


図-6 変形と主応力の流れ

3. 1の層せん断力-層間変位関係において、接合部全域に付着を与えたOKJ3Bの最大耐力は、付着のないOKJ3B-R2よりも低い耐力となった。これは、梁主筋付着が良好な場合、接合部内に幅広いコンクリート斜め圧縮ストラットが形成されるので、ストラットの圧壊が遅れ、耐力が上昇するという考え方とは異なる結果といえる。そこで、耐力時の接合部内有効圧縮強度分布を図-8に示し、検討を行う。OKJ3Bの接合部コンクリート要素は、有効圧縮強度が600~700kgf/cm²まで低下している。一方、OKJ3BN-R2は、有効圧縮強度がOKJ3Bより高い傾向がみられる。このような有効圧縮強度分布の違いにより、付着のないOKJ3BN-R2の最大耐力が、付着のあるOKJ3Bより高くなったと考えられる。有効圧縮強度分布の相違の原因として、既往のひび割れコンクリートの圧縮強度低減モデル[4][5][6]が、図-3に代表されるように、コンクリート強度と引張主ひずみをパラメータとして提案されていることが考えられる。即ち、OKJ3Bでは梁主筋付着力の伝達によって、接合部コンクリート要素の引張主ひずみが増大し、有効圧縮強度が顕著に低下するが、OKJ3BN-R2では付着力の伝達がないため、引張主ひずみが増大せず、OKJ3Bより有効圧縮強度が低下しないと考えられる。

4. まとめ

1. 接合部内梁通し筋付着力を圧縮ストラット領域だけに負担させた場合、接合部全域に負担させた場合よりも、約10%の接合部せん断強度の低下がみられた。
2. 接合部全域の梁主筋付着をなくした場合、全域に付着を与えた場合よりせん断強度が上昇した。これは、付着をなくした場合の接合部コンクリートの有効圧縮強度が、付着を与えた場合よりも低下しなかったためであると考えられる。

【謝 辞】 本研究は、文部省科研費補助金(総合研究(A):課題番号 04302049、研究代表者 野口博)の分担研究である。

【参考文献】

[1] 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、p. p. 475~478、1991
 [2] 張愛暉: 鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析、千葉大学学位論文、1990
 [3] 内田和弘、野口博: 混合構造接合部の有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集14-2、p. p. 15~20、1992
 [4] 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、p. p. 9~14、1992
 [5] N. J. Stevens, S. M. Uzumeri, M. P. Collins and G. T. Will: Constitutive Model for Reinforced Concrete Finite Element Analysis, ACI Journal, p. p. 49~59, January-February 1991
 [6] 国土開発技術研究センター: 平成3年度NewRC研究開発概要報告書、p. p. 3-2-52~54、1992

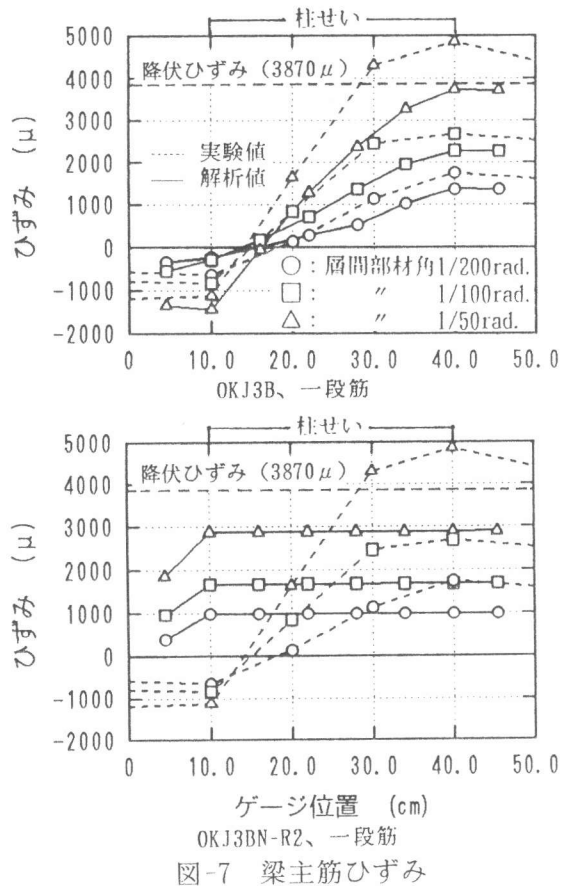


図-7 梁主筋ひずみ

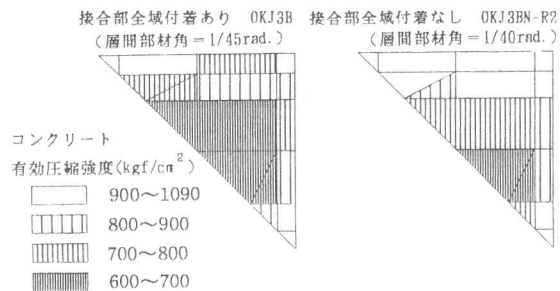


図-8 接合部内有効圧縮強度