

論文

[2002] 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

柏崎隆志*1・野口博*2

1. はじめに

日本建築学会の『鉄筋コンクリート(RC)造建物の終局強度型耐震設計指針』[1]では、ぜい性的な接合部せん断破壊と接合部内梁通し筋の過度な付着劣化を防止することが規定され、従来に比べ合理的な接合部設計が行われるようになったが、高強度材料を使用した接合部の耐震性については、更に検討が必要であると考えられる。そこで、本研究では、高強度材料を用いた内柱・梁接合部実験[2][3]を2次元非線形有限要素解析(FEM解析)により検証し、接合部せん断挙動と梁主筋付着性状について検討する。

2. 解析方法

2.1 解析対象試験体

解析対象試験体は、文献[2][3]の試験体の内、接合部せん断破壊が卓越し、コンクリート強度を主なパラメータとしたOKJ-1、3、6と接合部せん断破壊以前に梁曲げ降伏が生じたMKJ-1、3の計5体である。全試験体とも実大構造物の約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、梁部材の断面形状は、各々30cm×30cm、20cm×30cmである。加力は、柱頭に定軸力($\sigma_o = 0.12\sigma_B$, σ_o : 柱軸応力度)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。試験体諸元を表-1、試験体の配筋図を図-1に示す。破壊モードは、OKJ-1とMKJ-1、3が梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊型(B・J型)、OKJ-3、6が接合部せん断破壊先行型(J型)と判断されている。

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[4][5]のコンクリート圧縮強度低減係数を文献[6]のモデルI式に修正したプログ

*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 試験体諸元

試験体名	OKJ-1	OKJ-3	OKJ-6	MKJ-1	MKJ-3	
梁	上端主筋 下端 "	9-D13 7-D13	2-D13 2-D13	3-D13 3-D13	2-D19 2-D19	2-D22 2-D19
	降伏応力度	D13*:7320		D19:7860	D22:7570	
柱	主筋 降伏応力度	20-D13	22-D13	20-D13	12-D10	12-D13
	降伏応力度	D13*:7320		D10:6570	D13:8100	
接合部	フープ 降伏応力度	$p_w=0.53\%$	$p_w=0.27\%$	$p_w=0.43\%$	$p_w=0.27\%$	$p_w=0.33\%$
	降伏応力度	D6*:9740		D6*:6860		
コンクリート強度 σ_B	714	1091	546	860	1004	
梁曲げ降伏時接合部せん断入力レベル τ_{pp}	154.4 =0.19F _c =5.5 $\sqrt{F_c}$	193.0 =0.16F _c =5.6 $\sqrt{F_c}$	144.8 =0.24F _c =5.9 $\sqrt{F_c}$	91.7 =0.11F _c =3.2 $\sqrt{F_c}$	107.7 =0.10F _c =3.2 $\sqrt{F_c}$	
梁主筋付着指標 μ	10.7	8.8	12.4	16.5	16.2	

注) 応力度、強度、入力レベル: kgf/cm². *: 0.2%off-set強度. p_w : 横補強筋比。

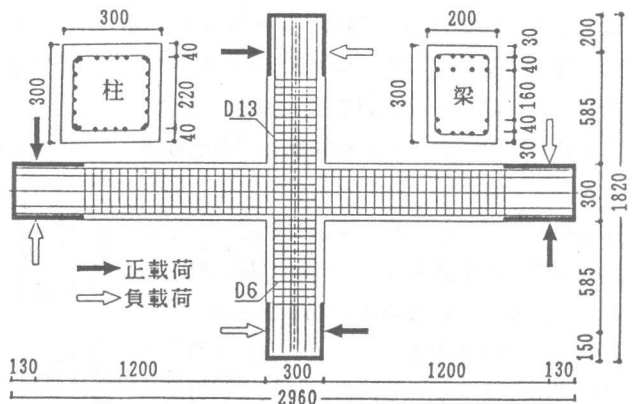


図-1 試験体配筋図(OKJ-1)

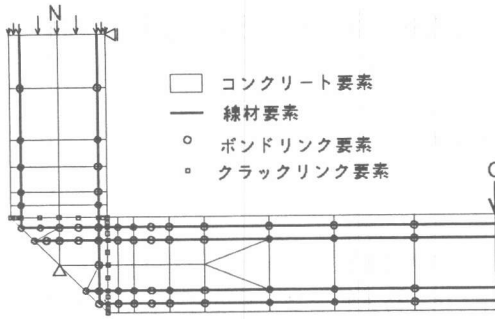


図-2 要素分割図(OKJ-1)

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。加力は、実験に従い、柱頭に定軸力を加えた後、梁端部への変位増分法を用いる。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節点の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のモデルを用い、横補強筋による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。ひびわれ発生後のコンクリート圧縮強度低減係数には、モデルI式[6]を用いる。

鉄筋：柱一段筋と梁主筋を2節点線材要素で、また柱中段筋と各部材横補強筋を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、離散型のボンドリンク要素で表現する。ボンドリンク（梁主筋）の付着応力度-すべり関係の形状は、実験結果から、接合部かぶり引張領域および塑性ヒンジ領域とその他の領域で図-3に示すようにモデル化する。**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

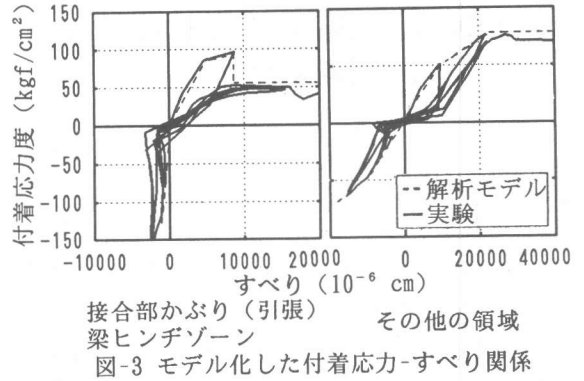


表-2 ボンドリンク材料定数

ボンドリンクの位置		弾性付着剛性 (kgf/cm²)	第2付着剛性 (kgf/cm²)	折れ点付着応力 (kgf/cm²)	最大付着応力 (kgf/cm²)
OKJ	接合部かぶり(引張)	8000	600	30	40
	接合部かぶり(圧縮)	12000	800	110	180
	接合部コア	16000	1000	200	350
MKJ	接合部かぶり(引張)	8000	400	100	120
	接合部かぶり(圧縮)	12000	1000	62	160
	接合部コア	30000	3000	140	270

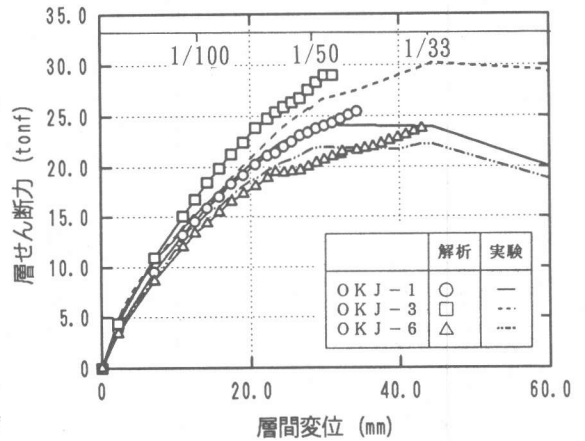


図-4 層せん断力-層間変位関係(OKJ-1、3、6)

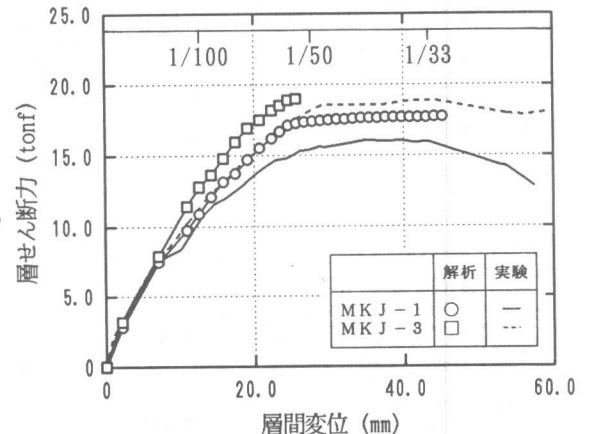


図-5 層せん断力-層間変位関係(MKJ-1、3)

が顕著となる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。ボンドリンクの材料定数は、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。ボンドリンクの材料定数を表-2に示す。

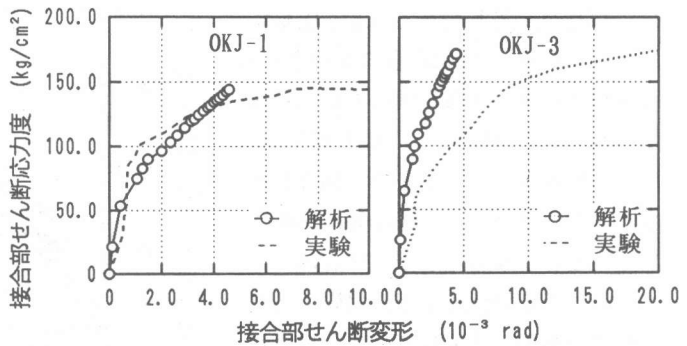


図-6 接合部せん断応力度-接合部せん断変形関係(OKJ-1、3)

3. 解析結果

3.1 履歴特性

図-4、5にOKJシリーズとMKJシリーズの層せん断力-層間変位関係を示す。OKJシリーズは、層間部材角 $R_s=1/200\text{rad}$ 程度までの初期剛性が、OKJ-3、1、6のコンクリート強度順に高く、実験との対応も良好であるが、それ以降から $R_s=1/50\text{rad}$ までは実験と比較して、OKJ-3が高め、OKJ-6が低めとなっている。最大耐力は、3体とも実験値の約±10%以内の範囲に位置し、良好な対応を示している。MKJシリーズもOKJシリーズと同様に、初期剛性は実験と良好な対応を示しているが、 $R_s=1/100\text{rad}$ 以降から解析値が次第に高めとなり、最大耐力はMKJ-1が約10%程度解析値が実験値を上回った。図-6にOKJ-1、3の接合部せん断応力度 τ_p -せん断変形 γ_p 関係を示す。OKJ-1、3は接合部せん断破壊が顕著な試験体である。OKJ-1は、最大耐力時接合部せん断変形が実験値より小さいが、初期加力段階ではある程度一致している。これに対し、OKJ-3は、解析の初期剛性がかなり高く、最大耐力付近でもせん断変形の増大はみられない。

3.2 変形および主応力

OKJ-1の最大耐力時の変形図と主応力図を図-7に示す。更に比較のために実験時のひびわれ図と $R_s=1/200\text{rad}$ の主応力図を図中に示す。変形は、梁危険断面の引張側で、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、接合部パネル内のせん断

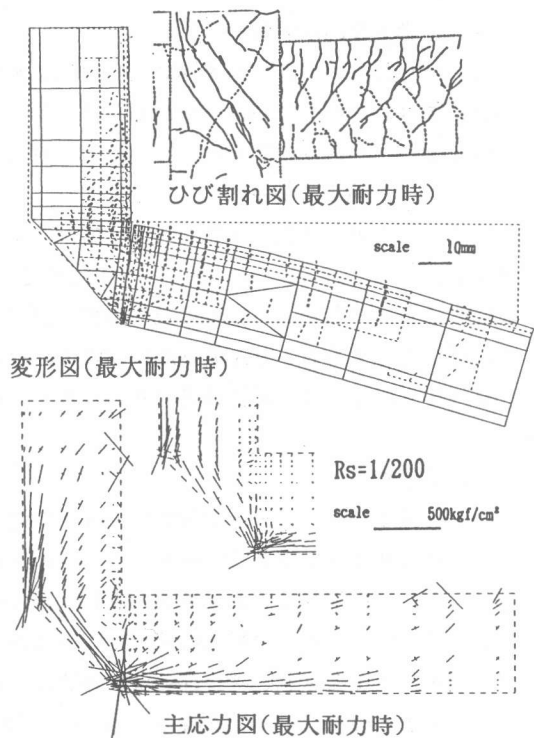


図-7 変形および主応力図(OKJ-1)

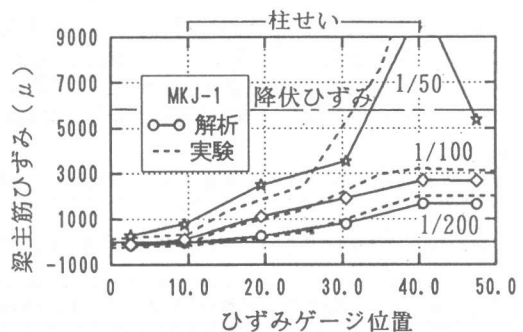


図-8 梁主筋ひずみ分布(MKJ-1)

ひび割れが顕著となっている。圧縮主応力は、 $R_s=1/200\text{rad}$ の接合部パネル内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、 $R_s=1/100\text{rad}$ 以降から最大耐力に至るまで、接合部パネルの対角辺に沿って集中的に伝達されている。すなわち、梁→接合部→柱へと流れる応力伝達機構が明確であり、特にせん断力の増大に伴って、接合部内圧縮ストラットの応力状態が厳しくなっている。

3.3 梁主筋のひずみ

MKJ-1の梁主筋(D19)ひずみ分布を図-8に示す。 $R_s=1/100\text{rad}$ までは接合部内圧縮側鉄筋の引張転化現象はみられないが、圧縮ひずみはかなり小さな値となっている。引張側ひずみは実験値と比較して若干小さめの値となっているが、対応はかなり良好である。

3.4 接合部せん断強度

図-9に最大耐力時接合部せん断応力度-コンクリート強度関係を示す。文献[1]の接合部せん断強度式($=0.3\sigma_B$ 、 σ_B :コンクリート圧縮強度)は、高強度コンクリート領域でせん断強度を過大評価する傾向がある。圧縮強度低減係数[6]を考慮したFEM解析の結果、実験の接合部せん断強度と良好な対応を示し、せん断強度はおよそ $5\sim 6\sqrt{\sigma_B}$ の範囲に位置する。またマクロモデル的にコンクリート圧縮強度有効係数を考慮した李らの提案式[7]は本解析結果のほぼ下限値を表している。

4. まとめ

1. 高強度コンクリートに適用可能な圧縮強度低減係数[6]を考慮したFEM解析結果は、実験のせん断強度と良好な対応を示し、せん断強度はおよそ $5\sim 6\sqrt{\sigma_B}$ の範囲に位置する。又マクロ的に圧縮強度有効係数を考慮した李らの提案式[7]は、本解析結果のほぼ下限値を表す。
2. 接合部せん断力の増大に伴って、接合部圧縮ストラット域が狭まり、更に圧縮主応力が集中的に伝達され、接合部破壊が顕著となる。
3. 梁主筋のボンドリンク特性の形状を引張側かぶり領域および梁ヒンジゾーンとその他の領域に区別してボンド定数を与えた場合、解析のひずみ分布と実験値は良好に対応した。

【謝辞】本研究は、建設省NewRC総プロ(委員長:青山博之東大教授、構造成能分科会主査:小谷俊介東大教授)の一環として行われ、接合部・架構WG(主査:野村設郎東京理科大学教授)では、貴重な御助言を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。また、本研究は文部省科研費補助金(総合研究(A):課題番号 0430249、研究代表者 野口博)による分担研究である。

【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・解説、1990
- [2]柏崎ほか: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
- [3]柏崎ほか:超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部の梁主筋付着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、14-2、pp.397~400、1992
- [4]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
- [5]内田ほか: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、pp.15~20、1992
- [6]岡崎ほか:普通強度及び高強度RC要素の構成則に関する研究(その1、2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C、pp.1051~1054、1992
- [7]李ほか: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、14-2、pp.379~384、1992

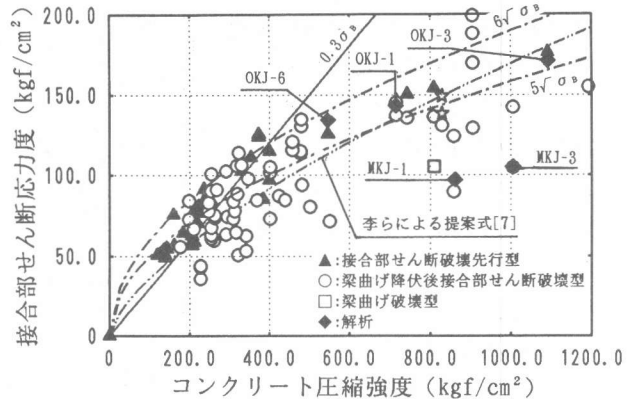


図-9 最大耐力時接合部せん断応力度-コンクリート強度関係