

論文 新しい柱・梁接合部補強法による柱・梁接合部せん断性能に関する2次元FEM解析の研究

張 大長^{*1}・野口 博^{*2}・柏崎隆志^{*3}

要旨:新しい柱・梁接合部補強法によるRC造柱・梁接合部の力学的挙動を調べるために、補強状況と付着状況、破壊モードを変数として柱・梁接合部の2次元FEM解析を行った。解析結果から、新しい柱・梁接合部補強法と梁主筋の付着向上が接合部の破壊モードの改善と、せん断耐力を高めるのに有効であることを確認した。また、柱・梁接合部の破壊モード¹⁾を分布ひび割れと離散ひび割れモデルを利用して検討した。

キーワード: 新しい柱・梁接合部補強法 2次元FEM解析 ひび割れ 劣化

1.はじめに

終局強度型設計法を採用すると、柱及び梁部材の脆性破壊を防ぐための配筋規定の強化により、接合部せん断応力レベルが高くなり、架構中の相対的弱点は、柱梁接合部へ移行しつつある。このような状況下では、柱・梁接合部への入力せん断力や接合部域梁主筋の付着応力が増大する傾向があるので、柱・梁接合部の韌性が低下し、接合部の脆性破壊が発生する可能性が指摘されおり、柱・梁接合部のせん断耐力を高めるために、種々の補強方法が探索されている。本研究では、塩原らにより提案された抵抗機構に基づく補強試験体¹⁾を対象として、RC内柱・梁接合部の2次元FEM解析を行い、載荷一変位関係、接合部域の梁主筋ひずみ分布、コンクリートの応力分布及び新しい柱・梁接合部の補強法の効果を検討することを目的とした。更に、柱・梁接合部の変形性状や破壊モードについても検討を行った。

2. 解析対象試験体

2.1 塩原らの破壊モデル²⁾

塩原らが提案した柱・梁接合部破壊モデルは図1に示すような2種類の接合部の変形モードである。Bモードは梁端部のひび割れに抜け出

して梁端部のひび割れを拡大させ梁端部の回転変形が顕著となるモードである。一方、Jモードは接合部内に生じた斜めひび割れの拡大により接合部パネルの回転、すなわちせん断変形が卓越するモードである。

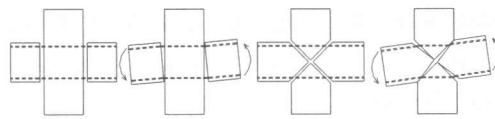


図1 2種類の接合部変形モード

2.2 解析試験体

本研究では、前述の変形モードを考慮した補強法の効果を検討するために、塩原らが実験を行った柱・梁接合部試験体S₃、S₄を解析対象とした。試験体の寸法・配筋と接合部の補強詳細を図2に示す。従来補強試験体S₃は、在来の梁通し筋とした柱・梁接合部で梁降伏前にせん断破壊するように設計された。新補強試験体S₄は、従来補強試験体S₃と寸法・配筋、材料強度は共通としたが、梁主筋に補強ディテールが追加された。コンクリートの平均圧縮強度は、現場養生シリンダーの圧縮試験で28MPaとなった。表1に鉄筋とタイプレートの材料特性を示す。

加力は、柱に100kNの定軸力を載荷し、柱

*1 千葉大学自然科学研究科 工修（正会員）

*2 千葉大学教授 工学部デザイン工学科建築系 工博（正会員）

*3 千葉大学助手 工学部デザイン工学科建築系 工修（正会員）

頭位置に正負繰り返し水平変位が載荷された。

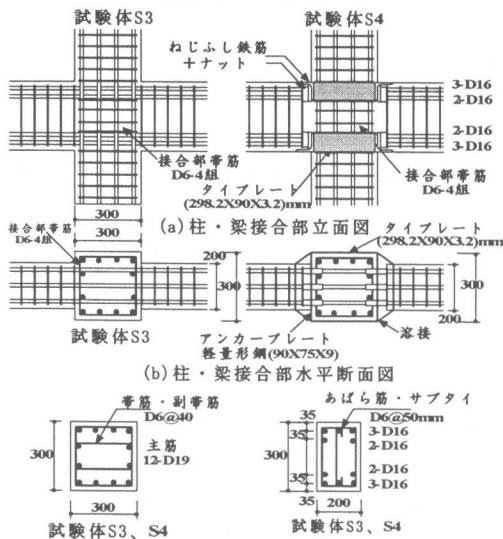


図 2 試験体の寸法・配筋と接合部の補強詳細

試験体 S₃、S₄の実験から得られた層せん断力一層間変位角の関係を図 7 に示す。実験では、新補強試験体 S₄の最大層せん断力 165 kN は、従来補強試験体 S₃の 128kN より 28% 高く、補強による有意な強度差が認められた。

表 1 鉄筋とタイプレートの材料特性

鉄筋及び プレート	公称断面 積(cm ²)	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	ヤング率 E_y (GPa)
D6 帯筋	0.32	390	580	185
D16 梁主筋	1.99	470	660	194
D19 柱主筋	2.87	450	680	208
タイプレート	2.88	353	475	205

3. 解析プログラム

本研究では汎用プログラム DIANA を使用し、更にユーザサプライドサブルーチン機能を用いて、以下の材料モデルを付加した。尚、解析では、実験時の材料定数を用いた（表 1 参照）。

3.1 有限要素と材料モデル

(1) コンクリート

コンクリートには、4 節点アイソパラメトリック平面要素を用いた。二軸応力下の構成則には Darwin と Pecknold³⁾ 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

Vecchio and Collins⁴⁾ の総ひずみに基づく分布ひび割れモデルに基づく。図 3 に示す圧縮応力一ひずみ関係の上昇域には Saenz モデル⁵⁾を用い、下降域では Modified Kent-Park 等⁶⁾のモデルを用いた。濱田・野口ら式⁷⁾に基づき、横補強鉄筋による拘束効果とひび割れによる圧縮強度の低減を考慮した。引張側では、ひび割れ発生後は、鉄筋付着効果を考え、応力を部分解放するテンションスティフニングモデルとし、引張軟化域は Gilbert-Warner モデル⁵⁾を用いた。

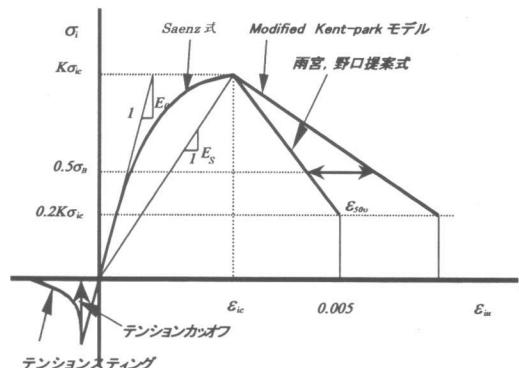


図 3 コンクリートの応力一ひずみ関係

(2) 鉄筋

主筋には、2 節点トラス要素を用いた。応力一ひずみ曲線は図 4 に示すバイ・リニアに近似し、 $E_2 = E_1 / 100$ としている。帯筋とあばら筋は積層要素で表現した。積層要素内のひび割れは、分布ひび割れモデルで表し、Al-Mahaidi 式⁸⁾によりせん断剛性を劣化させた。尚、帯筋とあばら筋は Von Mises の降伏条件に基づき、等方硬化モデルとした。

(3) 接合要素

鉄筋とコンクリート間の付着特性には、2 節点のボンドリンク要素を用いた。付着応力一すべり関係は、図 5 に示すバイ・リニアモデルとした。付着強度の算定には、藤井、森田⁹⁾の提案式を用い、初期剛性は森田、角¹⁰⁾の実験結果により定めた。接合部内の斜めひび割れは離散ひび割れモデルを用いて表現した。離散ひび割れの強度はコンクリートの引張り強度とし、ひび割れ時の破壊エネルギーを 0.05 N/mm^2 、ひび割

れ後のせん断剛性低下率を10%として用いた。

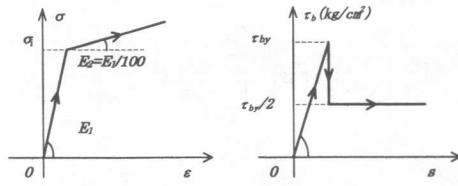


図4 鉄筋応力—ひずみモデル

図5 付着応力—すべり関係

3.2 試験体のモデル化

有限要素分割を図6に示す。柱、梁主筋とコンクリート間にボンドリンク要素なし及び、ボンドリンク要素ありの2種類とした。ひび割れモデルには、分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデル2種類の場合を検討した。実験では正負繰り返し載荷が行われたが、解析では単調載荷とした。接合部の対角方向に沿ってX型に離散ひび割れを配した。離散ひび割れモデルは、図5に示すような繰り返し載荷で生じた接合部のX型のせん断ひび割れが、開閉する機構（塩原モデル）を直接表現できると考えられる。それに対し、分布ひび割れモデルは、要素の積分点周辺に一様に生じるひび割れであり、予めそのパターンは設定していない。試験体S4の補強タイープレートは積層要素で表現し、梁主筋はタイープレート部内で完全付着と認める。

3.3 加力方法及び境界条件

図6に示すように、加力方法は柱に100kNの一定軸力を載荷した後、梁の両端に鉛直変位増分（左梁：下向き、右梁：上向き）を加えた。

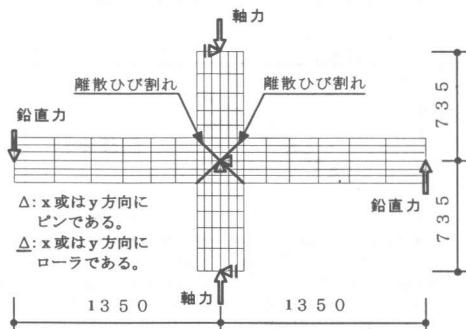


図6 試験体要素分割と境界条件

実験では柱頭に正負繰り返し荷重が与えたが、解析では梁両端に単調載荷とした。境界条件は、柱両端にはx方向を固定した。接合部の中央点にはx、y方向とも固定した。実験中でP-δ効果は1/100しかがなく、解析と実験一致させると認める。

4. 解析結果

4.1 荷重—変形関係

図7に層せん断力—層間変位角の実験結果と解析結果の比較を示す。図中には、完全付着を仮定した解析結果(FEM1)と接合要素(ボンドリンク要素)の材料モデルとして非線形を仮定した解析結果(FEM2)を示す。試験体S3、S4とともに、柱、梁主筋の付着を完全とすると接合部の最大耐力は実験結果よりそれぞれ24.8%，20.0%高めとなった。試験体S3では最大耐力後の耐力低下が顕著であるのに対し、試験体S4では、耐力低下が小さい。ボンドリンクにより柱、梁主筋の付着を考慮した解析では、分布ひび割れモデル、分布と離散のひび割れ併用型

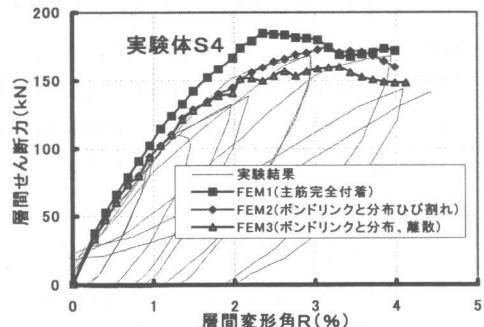
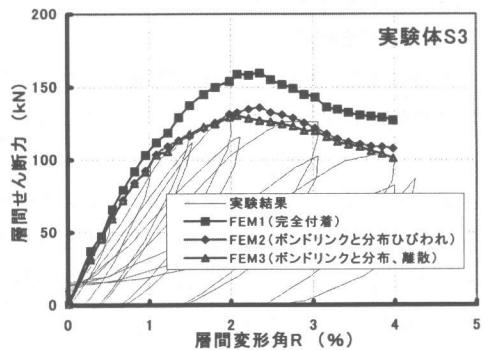


図7 実験結果と解析結果の荷重—層間変形角

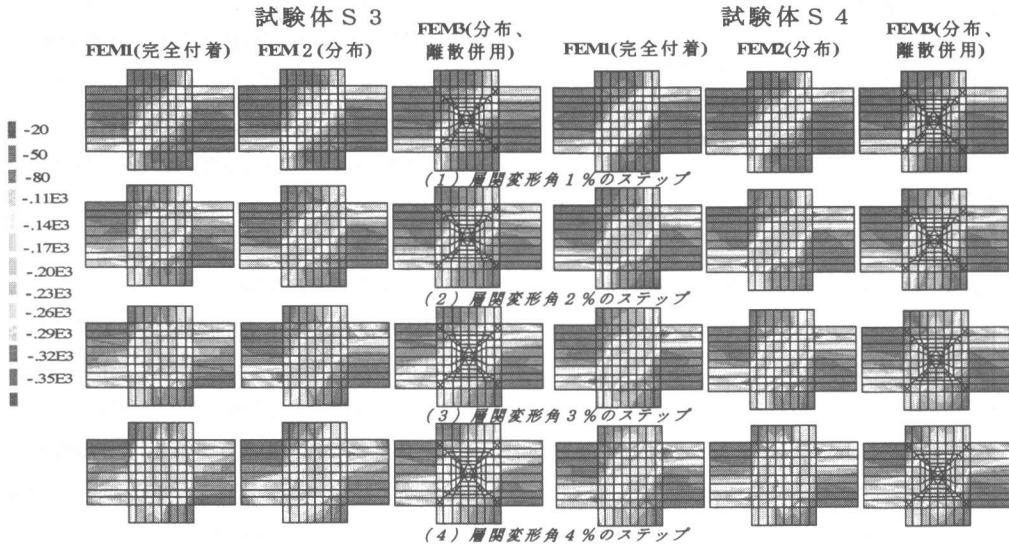


図8 接合部コンクリートの圧縮主応力分布 (kg/cm^2)

モデル (FEM3) とともに、実験結果に大概対応している。柱、梁主筋の付着特性が、柱・梁接合部の層せん断力—層間変位角関係に大きな影響を与えることがわかる。

4. 2 接合部応力、ひずみ性状

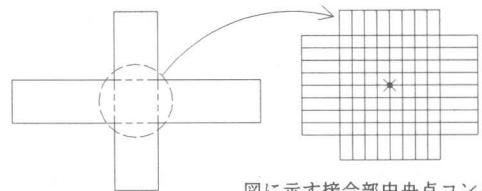
(1) 接合部コンクリート

1) 圧縮主応力

試験体 S3, S4 の FEM1—FEM3 について図 8 に層間変位角 $R = 1, 2, 3, 4\%$ 時の接合部コンクリートの圧縮主応力分布を示す。4段階の主応力を見ると、接合部中央部のコンクリート圧縮主応力の大きさには変化が見られるが、中央部では右上から左下への対角状の圧縮応力流れ(圧縮ストラット)が生じている。ストラットの形状は、付着を考慮した場合の方が、幅は中央でふくらまず一様に圧縮応力が流れ、応力値は高めになり、応力分布が集中になる。補強ありの S4 では、補強された接合部域の梁主筋を完全付着としたので、柱・梁主筋の付着性状の差による S3 ほど、ストラットの形状差は顕著に表れていない。

補強なしの S3 では、層間変位角 $R=2\%$ を超えると最大耐力に達し、同じ層間変位角 R で完全付着の場合の荷重はボンドリンクの方より高いため、圧壊による圧縮ストラットが薄まり、消

失していくが、補強された S4 では、 $R=4\%$ でも圧縮ストラットは維持されている。このように、柱、梁主筋の付着状況と接合部の補強状況は、接合部の圧縮ストラット応力分布、耐力、



図に示す接合部中央点コンクリートの劣化状況を検討する。

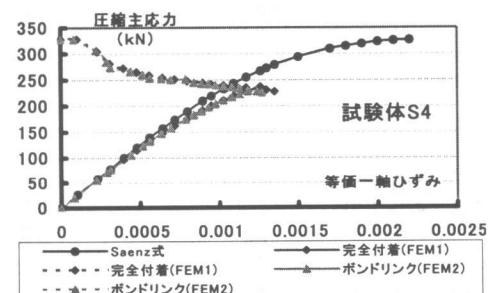
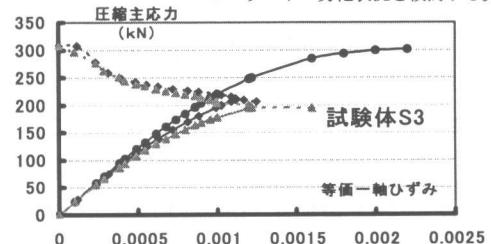


図9 圧縮主応力—等価一軸ひずみ関係

変形性能に影響を及ぼすこと認められた。

2) 圧縮主応力—等価一軸ひずみの関係

図8の圧縮主応力分布よりコンクリートの応力状態をある程度推定できるが、詳細にはひずみ状況も合わせて検証しておく必要がある。また、コンクリートの最大強度は、2軸圧縮応力下では上昇しており、ひび割れたコンクリートでは野口等の提案式に従い、引張りひずみの増大に伴い減少していく。そこで、S3、S4の圧縮主応力—等価一軸ひずみ関係を図9に示す。試験体S3では、完全付着の場合(FEM1)の剛性はボンドリンクの場合(FEM2)より高く、コンクリートの劣化はやや遅い。試験体S4ではタイプレート補強部内は完全付着と仮定したため、FEM1とFEM2の剛性と劣化は大体同じである。梁主筋の付着状況はコンクリートの剛性と劣化状況に及ぼす影響が認められ、完全付着の場合には、剛性はやや高く劣化は遅い。

(2) 梁主筋ひずみ分布

梁主筋(下端筋)のひずみ分布を図10に示す。図中では、解析結果と実験結果とともに、層間変位角R=1, 2, 3, 4%時のひずみ分布を

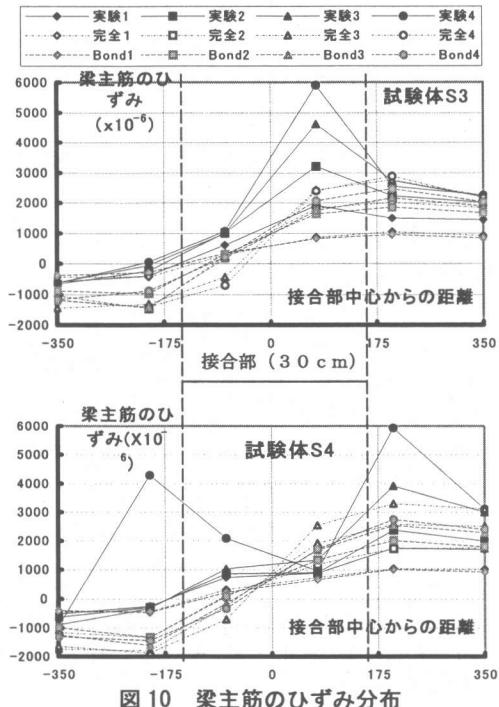


図10 梁主筋のひずみ分布

示している。即ち、実験1, 2, 3, 4は、それぞれ層間変位角R=1, 2, 3, 4%時の実験値である。また、完全1, 2, 3, 4とBond1, 2, 3, 4はそれぞれ完全付着(FEM1), ボンドリンクを考慮した場合(FEM12)の層間変位角R=1, 2, 3, 4%時の解析値である。主筋ひずみは、解析結果と実験結果で多少差異が見られる。完全付着の場合(FEM1)は付着を考慮した場合(FEM2)よりひずみが大きい。新補強試験体S4では梁主筋はタイプレート部内で完全付着としたので、主筋の引張ひずみは圧縮ひずみとほぼ対称になるが、実験ではやや付着劣化が生じ始めていた。

4. 3 変形性状及び破壊モード

(1) 変形成分

梁、柱、接合部の変形成分—層間変位角の関係を図11に示す。従来補強試験体S3は最終の梁の変形が小さく、接合部の変形がかなり大きい。新補強試験体S4は最終の梁の変形がS3より大きく、接合部の変形が大きくならず、韌性を有する変形性状を示した。新しい接合部補強法によって、接合部の破壊モードがS3のような接合部せん断破壊からS4のような梁曲げ破壊へ変わることから、補強方法が有効であることが解析からもわかる。

(2) 変形モード

解析から得られた層間変位角R=3%時の接合

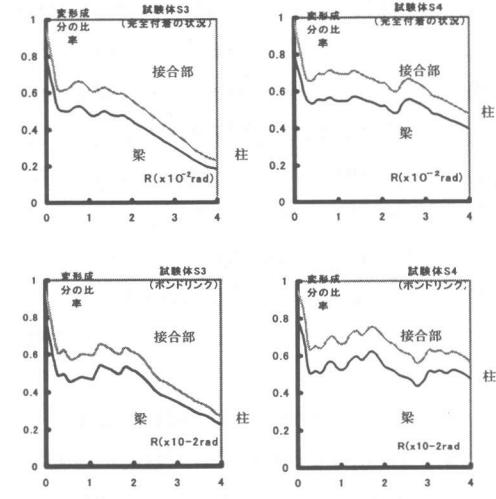


図11 柱梁接合部の変形成分

部中央部分の変形状況を図 12 に示す。ボンドリンクの場合は、接合部変形の増加の割合は完全付着の場合よりやや大きい。 $R=4\%$ 時のせん断変形については、ボンドリンクを考慮した場合の方は完全付着の場合より大きかった。新補強試験体 S4 は従来補強試験体 S3 より変形がやや小さい。対角線方向に離散ひび割れモデルが入ったモデルでは解析中で図 12 に示すようにひび割れが発生し、塩原らによる抵抗機構モデルの動きと対応している。

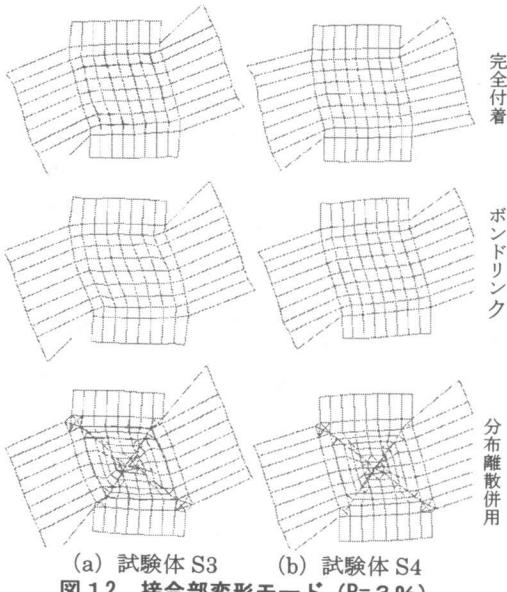


図 12 接合部変形モード ($R=3\%$)

(3) 接合部の破壊モデル

試験体 S3 は、層間変位角 2 %で層せん断力は最大値 128kN に達し、接合部の斜めひび割れの拡大により接合部変形が増大し、最後せん断破壊が発生した。一方、試験体 S4 は、層間変位角 3 %で層せん断力は最大値 165kN に達し、最後には梁曲げ破壊が発生した。図 11 に示した接合部の変形成分の分析によりこれを確認することができた。図 12 に示すように、変形モードについては、接合部パネルの回転破壊の発生を離散ひび割れモデルを考慮した解析により再現することができた。

新しい接合部補強法による接合部破壊モードと強度の変化は塩原らにより実験的に検証された。FEM 解析においても、接合部の変形成分と

変形モードの考察によりそれらを確認することができた。本解析では、耐力以降、試験体 S3, S4 は J モードの変形となり、その後、離散ひび割れ周辺のコンクリートは圧縮破壊が発生した。S4 の併用型モデルの解析において、S3 のような変形モードが見られることは、接合部せん断ひび割れを離散ひび割れで表現することに起因するということである。最終的には、試験体 S3 は離散ひび割れの開口が著しくせん断破壊が発生したが、試験体 S4 は離散ひび割れの開口が抑えられ、梁に曲げ破壊 (B モード) が発生した。新しい柱・梁接合部補強法の有効性、破壊モードの変化を解析的に検証することができたと考えられた。

5.まとめ

(1) 塩原らによる新しい接合部補強ディテールは層せん断力を上昇させ、破壊モードを接合部せん断破壊から梁曲げ降伏に変化させるのに有効であったことが解析的にも確認された。

(2) 分布ひび割れモデルによる解析結果は、実験結果と良い対応を示した。

(3) 分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルの併用による解析結果は、実験結果と良い対応を示し、離散ひび割れの開閉状況から塩原らによる接合部破壊モデルが確認された。即ち、J モードの接合部回転が再現された。

(4) 梁主筋の付着性状は、接合部の耐力、破壊モードに及ぼす影響が大きい。

参考文献

- 1) Safaa ZAID, Hitoshi SHIOHARA, Ahunsuke OTANI : Test of Joint Reinforcing Detail Improving Joint Capacity of R/C Interior Beam-Column Joint, The 1st Japan-Korea Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Oct.29~30, 1999, Faculty Club House, Seoul National University, Seoul, Korea.
- 2) 塩原等：鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の 2 つの接合部破壊モードの解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 CII, pp797~799, 2000.
- 3) 色部 誠, 河角 誠, 安達 洋: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985.
- 4) DIANA 7.2, User's Manual, Nonlinear Analysis, Nov. 19, 1999.
- 5) Robert Park, M. ASCE, M. J. Nigel Priestley, and Wayne D. Gill: Ductility of Square-Confining Concrete Column, April 1982.
- 6) Christian Meyer: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, pp185~203, American Society of Civil Engineers, 1982.
- 7) 濱田聰, 野口博: ひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験、日本建築学会学術講演梗概集 構造 II, PP.397-920, 1988.10.
- 8) Al-Mahaidi, R.S.H.: "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members", Report No. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, January, 1979.
- 9) 藤井 栄, 森田 司郎: 異形鉄筋の付着剥離強度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 昭和 58 年 2 月。
- 10) 森田 司郎, 角 徹三: 繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 昭和 50 年 3 月。