

# 論文 2方向加力を受ける超高強度 RC 内柱・梁接合部の3次元非線形有限要素解析

永井智之\*1・柏崎隆志\*2・野口 博\*3

要旨：直交梁や2方向加力が、RC柱・梁接合部のせん断抵抗機構に与える影響を検討するために、超高強度材料を用いた内柱・梁接合部の既往の実験から、破壊モードが接合部破壊先行型の平面接合部と梁曲げ降伏先行型の立体接合部を解析対象に選び、3次元非線形有限要素 (FEM) 解析を行った。解析での初期剛性はやや高めであったが、最大耐力や破壊モードについては実験結果と良好な対応を示した。また、直交梁や45度加力の影響を履歴特性、鉄筋のひずみ、内部応力状態から確認することができた。

キーワード：内柱・梁接合部、2方向加力、せん断抵抗機構、有限要素解析

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造 (RC) 建物に地震力が入力されると、建物内の柱・梁接合部は2方向載荷状態となる。また、この時の接合部コンクリートは、柱軸力、接合部補強筋、直交梁などの影響で、3次元的な応力状態にあるといえる。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] (以下、学会指針) では、このような立体接合部に対する耐震設計について、柱の曲げ強度に見られるような2軸方向の耐力低下を考慮しなくて良いとしている。しかし、学会指針は適用範囲を普通強度材料とし、また数少ない実験結果に基づいているので、十分に合理的な設計法であるとは言えず、不明瞭な点も数多く残されている。そこで、本研究では、超高強度材料を用いた RC 柱・梁接合部の3次元非線形有限要素解析を行い、履歴特性、変形、鉄筋のひずみや内部応力状態などから2方向加力や直交梁が接合部せん断抵抗機構に与える影響を検討する。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析対象試験体

本解析では、柏崎・野口らによる、接合部せん断破壊先行型 (J型) の平面接合部 OKJ3 試験体[2]と、李、北山、小谷、青山

表-1 試験体諸元と材料特性

試験体名		平面接合部 OKJ3			立体接合部 I2		
梁	主筋	10-D13			8-D16		
	スターループ	2-D6@50 P <sub>w</sub> =0.63(%)			2-U6.4@35 P <sub>w</sub> =0.86(%)		
柱	主筋	22-D13			16-D19		
	フープ	2-D6@40 P <sub>w</sub> =0.53(%)			2-U6.4@40 P <sub>w</sub> =0.50(%)		
接合部	フープ	4-D6×3セット@50 P <sub>w</sub> =0.54(%)			4-φ6×2セット@30 P <sub>w</sub> =0.39(%)		
コン ク リ ー ト	1/4fc 割線剛性 (×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	4.42			4.00		
	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1091			1007		
	強度時ひずみ (μ)	2860			2752		
	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	61.3			43.0		
鉄 筋	呼び名	D6	D13	D16	D19	U6.4	φ6
	ヤング係数 (×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	1.86	1.90	1.854	1.843	1.90	1.90
	降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	9740*	7320*	8140	7610	13340	3670
	降伏時歪(μ)	7340	5870				
	最大応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	11630	7820	8770	8220	14260	4400

\*は 0.2%offset 法による

\*1 (株) 東京建築研究所 工修 (正会員)

\*2 千葉大学助手 工学部建築学科、工修 (正会員)

\*3 千葉大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

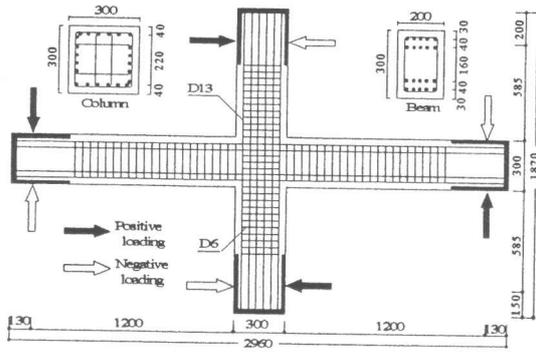


図-1 試験体配筋図 (OKJ3)

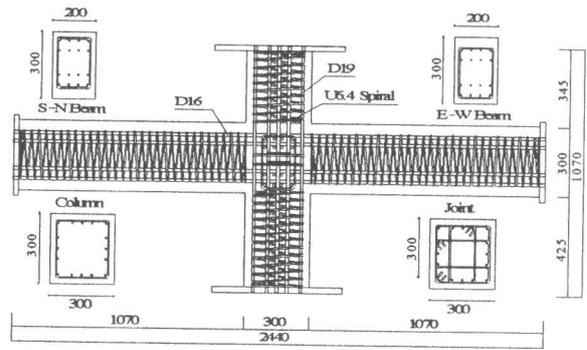


図-2 試験体配筋図 (I2)

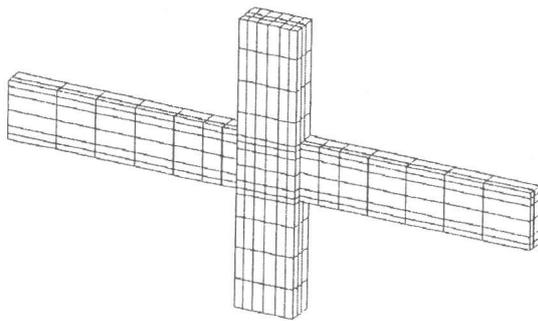


図-3 要素分割図 (OKJ3)

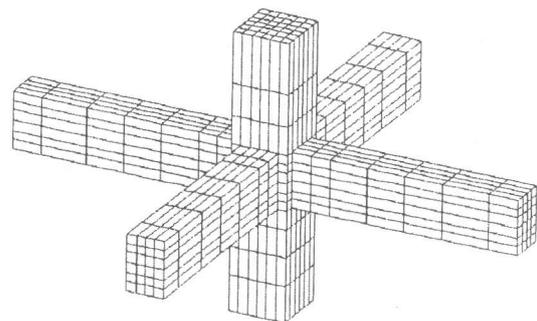


図-4 要素分割図 (I2)

による梁曲げ降伏先行型 (B型) の立体接合部 I2 試験体[3]を解析対象とした。OKJ3 は、実大の約 1/3 スケールの直交梁の無い平面十字型接合部で、階高が 147cm、梁スパンが 270cm、柱、梁断面は、それぞれ 30cm×30cm、20cm×30cm である。材料は、コンクリート強度が 1091kgf/cm<sup>2</sup>、梁主筋の降伏応力度が 7320kgf/cm<sup>2</sup> の高強度材料を用いている。接合部せん断補強筋比は 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荷が行われた。I2 は、直交梁付き立体接合部で、階高、スパンや柱、梁断面は、OKJ3 と同様である。材料は、コンクリート強度が 1007kgf/cm<sup>2</sup>、梁主筋の降伏応力度が 8140kgf/cm<sup>2</sup> の高強度材料を用いている。接合部せん断補強筋比は 0.39% である。加力は、32.4tonf の定軸力を与えた後、柱頭に変位制御による田の字型水平方向繰り返し荷が行われた。OKJ3 と I2 の試験体諸元と材料特性を表-1、試験体配筋図をそれぞれ図-1、図-2 に示す。OKJ3 の実験での破壊モードは、層間部材角  $R_s=1/33\text{rad.}$  で接合部せん断破壊がかなり進行して、最大耐力に至り、その時に梁主筋 (2 段筋) の降伏が生じていなかったことから接合部破壊先行型と判断されている。I2 では、N-S 方向の最大耐力直前 ( $R_s=1/17\text{rad.}$ ) に梁曲げ降伏が生じ、その後柱および梁の付け根部分のコンクリートが圧壊し、全体変形に対して梁曲げ変形成分が 60% 程度であったことから、梁曲げ降伏先行型と判断した。

## 2. 2 解析モデル

本解析では、米澤らによって開発された 3次元非線形有限要素解析プログラム (RCSFEM) [4][5] を用いた。平面接合部 OKJ3 と立体接合部 I2 の要素分割をそれぞれ図-3、図-4 に示す。OKJ3 については、加力軸に対して対象となるため、柱、梁を通る鉛直面から半分を解析対象とし、鉛

直切断面は面ローラー支持とした。柱頭、柱脚や両梁端の境界条件は実験に準じて決定した。以下に、本解析モデルの概要を示す。コンクリート：8 節点ソリッド要素を用い、主応力、剛性等を要素内 8 個の積分点で評価する。また、コンクリートを直交異方性体とし、Darwin-Pecknold らの等価一軸ひずみモデル[6]を Murray らが 3 次元に拡張したもの[7]を使用した。破壊基準は、Willam-Warnke の 3 パラメータモデル[8]に 2 つの自由度を加えた 5 パラメータモデル[9]を用いた。圧縮応力-ひずみ関係は、図-5 に示すように、上昇域には Fafitis-Shah モデル[10]を用い、高強度コンクリートの直線化を表現し、ひずみ軟化域には Kent-Park モデル[11]を用い、横補強筋による拘束効果を考慮した。ひび割れには要素積分点領域の分布ひび割れモデルを用い、ひび割れ平行方向のせん断剛性は無視した。材料定数は、コンクリートシリンダーの圧縮、割裂試験結果から決定した。鉄筋：鉄筋軸方向にのみ剛性を有する 2 節点線材要素を用い、応力-ひずみ関係は、実験での引張試験結果よりバイリニア型の形状とした。付着：鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とし、接合部からの梁主筋の抜け出し等は考慮していない。

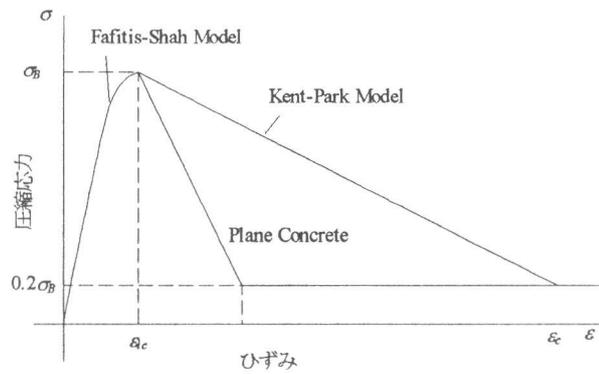


図-5 圧縮応力-ひずみ関係

### 3. 解析結果

#### 3. 1 履歴特性

図-6 に平面接合部 OKJ3 の層せん断力-層間変位関係を、図-7 に立体接合部 I2 の層せん断力-層間部材角関係を示す。立体接合部 I2 の層せん断力は、実験値、解析値ともに柱頭加力による軸力の P- $\delta$  効果を考慮した。また、実験値は N-S 方向の履歴特性の包絡線を示し、45 度加力の解析結果もそれに準ずる。

初期剛性は、すべて解析値が実験値に比べやや高めの値を示した。これは、梁危険断面の局所的な曲げひび割れが考慮されていないことも一因であると考えられる。OKJ3 の最大層せん断力は、解析値が  $P_s=33.0\text{tonf}$  となり、実験値 ( $P_s=29.9\text{tonf}$ ) より約 10% 高い値を示した。また、解析では最大耐力時に接合部内のコンクリート要素にひずみ軟化域に達したことが確認され、梁曲げ

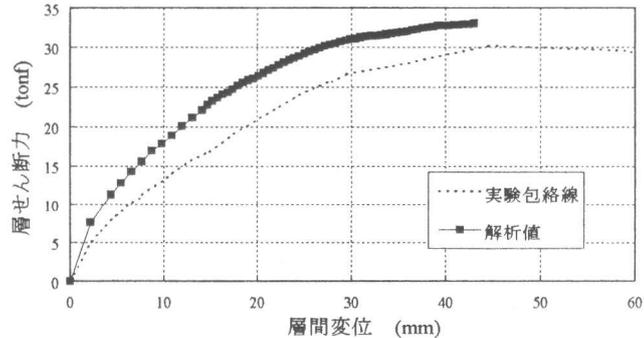


図-6 層せん断力-層間変位関係 (OKJ3)

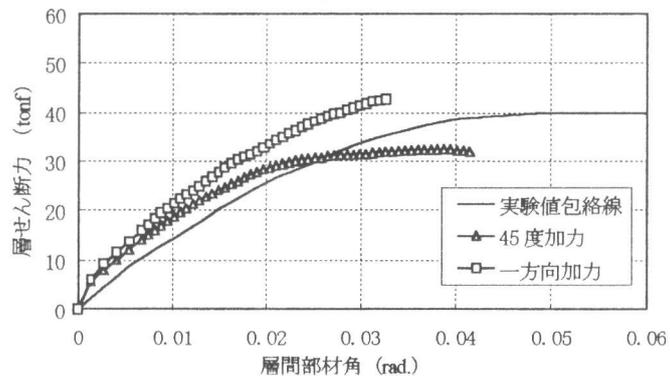


図-7 層せん断力-層間部材各関係 (I2)

降伏が見られなかったため、破壊モードは実験と同様に接合部破壊先行型である。I2の解析値は、1方向加力の最大層せん断力が  $P_s=42.7\text{tonf}$  で、実験値 ( $P_s=40.0\text{tonf}$ ) より約7%高い値を示し、45度加力では最大層せん断力のN-S方向成分が  $P_s=32.6\text{tonf}$  と低めの値を示した。

図-8に、接合部に入力されるせん断応力度の軌跡を示す。解析でのせん断応力度  $V_j$  は、 $V_j=(T+Cc+C_s-V_c)/b_j$  ( $T$ : 左右梁の引張力、 $Cc+C_s$ : 圧縮力、 $V_c$ : 柱せん断力、 $b_j$ : 接合部有効断面積) で表した。 $b_j$  は、柱幅と梁幅の平均値を用いた。また、45度方向のせん断応力度は、N-S (E-W) 方向成分から求めた。2方向加力における最大せん断応力度のN-S方向成分は、実験値や1方向加力での層せん断力と比較して低めの値である。しかし、45度方向の最大せん断応力度は一方加力時の値を上回っている。また、実験ではN-S方向の加力の後、その変位を維持しながらW-E方向の加力を行う時に、せん断応力度のN-S方向成分が減少する傾向がみられ、N-S方向成分ではなく45度方向で比較すると、解析値は実験値と良好に対応したと言える。さらに、解析では、 $R_s=1/33\text{rad}$ 付近で梁曲げ降伏が生じていることから、破壊モードは実験と同様に梁曲げ降伏先行型である。

### 3. 2 鉄筋ひずみ

図-9にOKJ3、図-10にI2の接合部内梁通し筋(1段筋)のひずみ分布を示す。なお、I2については、45度加力を行った解析の結果である。OKJ3、I2ともに、変形があまり大きくない加力初期段階では、解析値と良好な対応を示した。しかし、変形が進むにつれて解析値が小さめの値を示した。これは、実験では付着劣化や、梁危険断面のひび割れ増大による梁主筋の抜け出しが発生するのに対し、解析では完全付着

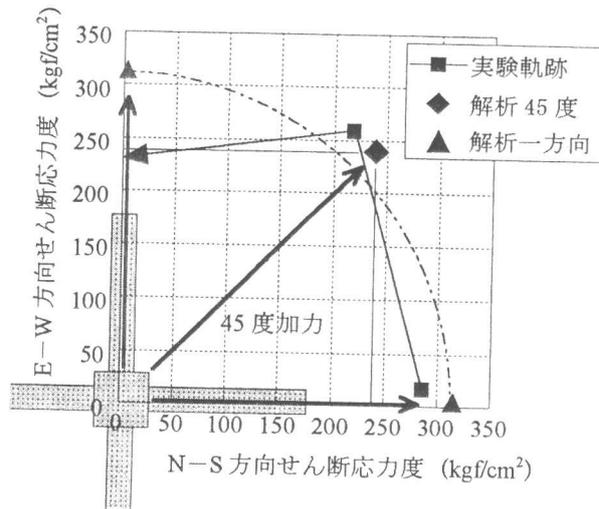


図-8 接合部入力せん断応力度軌跡 (I2)

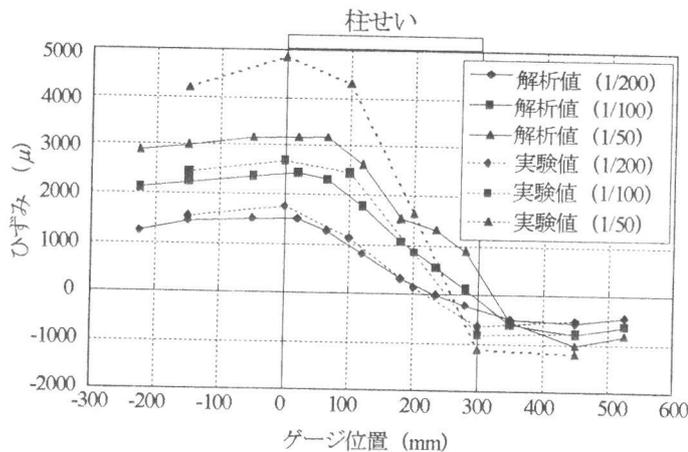


図-9 梁主筋(1段筋)ひずみ分布 (OKJ3)

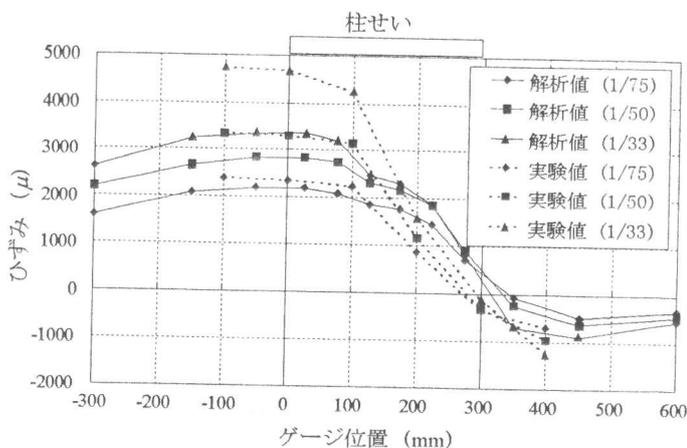


図-10 梁主筋(1段筋)ひずみ分布 (I2)

を仮定し、コンクリートと鉄筋間のすべりを無視していることや、梁危険断面の局部的なひび割れを考慮していないためであると考えられる。また、I2 の一方向加力を行った解析での梁主筋ひずみは、45 度加力の解析結果より、やや大きな値を示した。

図-11 に OKJ3 の接合部横補強筋のひずみを示す。解析での加力初期段階では、実験値と比較してひずみがかなり小さな値を示しているが、最大耐力付近では良い対応を示している。

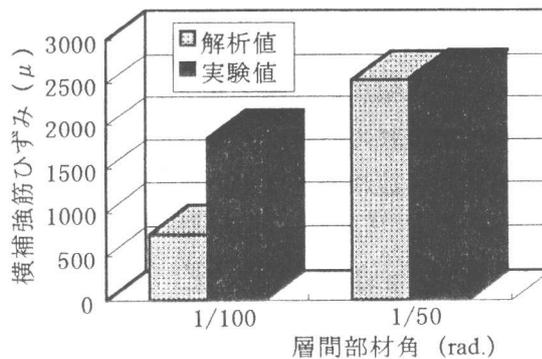


図-11 接合部横補強筋のひずみ

### 3. 3 接合部内応力状態

図-12 に、層間部材角  $R_s=1/100\text{rad}$ . 付近での接合部水平断面の圧縮応力コンターを示す。接合部中央部では、圧縮応力が中心に集中しているのに対し、接合部上部では、梁危険断面付近に集中していることから、接合部内に斜め圧縮ストラットが形成されていることが確認できる。

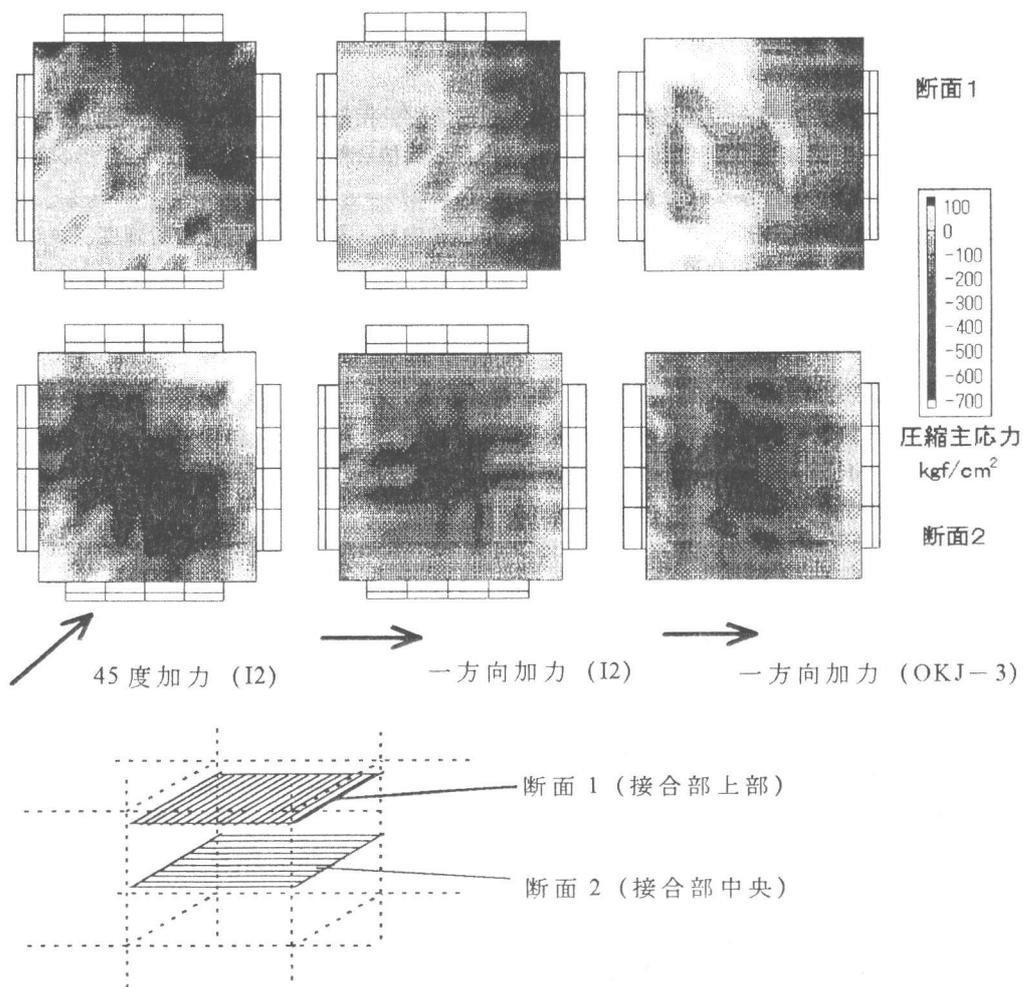


図-12 圧縮応力コンター

I2 の 45 度加力では、接合部内の広い領域に圧縮応力が伝達され、圧縮ストラットの幅が接合部中央と端部でほぼ同じまま、2本の梁に伝達されているのに対し、一方向加力では、接合部入り口付近では幅広い圧縮ストラットを形成するが、接合部中央でその幅が狭くなり、中心に応力が集中して流れているのが分かる。また、OKJ3 と I2 の一方向加力の比較により、直交梁の有無による応力の流れの差はあまり見られない。

#### 4. まとめ

接合部せん断破壊先行型の平面内柱・梁接合部 OKJ3 と、梁曲げ降伏先行型の直交梁付き立体柱・梁接合部 I2 について 3次元非線形有限要素解析を行い、履歴特性、破壊モード、鉄筋のひずみ、接合部内応力状態などの検討を行った。解析での初期剛性はやや高めであったが、最大耐力や破壊モードについては実験結果と良好な対応を示した。また、履歴特性、鉄筋のひずみ、内部応力状態から直交梁や 45 度加力の影響を確認することができた。

#### 【謝辞】

本研究の一部は、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: 野口 博) による。東京都立大学 北山和宏 助教授と前東京都立大学 李祥浩 助手には貴重な実験データを参考にさせていただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 【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・同解説、1990.11
- [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 13-2、pp.475-478、1991
- [3]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 14-2、pp.379-384、1992
- [4]米澤健次: コンクリート系構造部材の非線形有限要素解析手法の開発とせん断抵抗機構の分析、千葉大学学位論文、1995
- [5]雨宮 篤、内田和弘、野口 博: 鉄筋コンクリート部材の 3次元非線形有限要素解析プログラムの解析、コンクリート工学年次論文報告集 14-2、pp.21-26、1992
- [6]Darwin,D, and Pecknold,D,A: Nonlinear Biaxial Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM3, Proc.Paper 12839, April, 1977, pp.229-241
- [7]Alaa,A.Elwi, and David,W.Murray: 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.105, No.EM4, August, 1979, pp.853-866
- [8]William,K.J., and Warnke,E.P.: Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete, International Association for Bridge and Structural Engineering, Proceeding, Vol.19, 1975
- [9]Argyris,J.H.G.Faust, J.Szimmat, E.P.Warnke, and K.J.Willam: Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor, Nucl.Eng.Des, Vol.28, pp.42-75
- [10]Fafitis,A and Shah,S.P.: Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, ACI SP-87, pp.213-232, 1985
- [11]Park,R.,Priestley,M.J.N. and Gill,W.D.: Ductility of Square-Confined Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE,Vol.108, pp.929-950, April 1982
- [12]柏崎隆志、永井智之、野口 博: 超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断耐力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 17-2、315-320、1995