

## 論文 RC 造立体架構 2 層試験体の耐震性能に関する 3 次元 FEM 解析

水野 花恵<sup>\*1</sup>・柏崎 隆志<sup>\*2</sup>・野口 博<sup>\*3</sup>

**要旨**：スラブや直交梁の拘束効果によるねじりなどの影響を受けると考えられるフレーム中の柱梁接合部の挙動を把握するため、立体 2 層フレームの 3 次元 FEM 解析を行った。スラブ、直交梁の有無と梁偏心接合の有無をパラメータとした仮想試験体の解析も行い、それらの比較より、直交部材の効果や偏心接合の破壊性状への影響について定量的に検討した。その結果、偏心接合部においては接合部内部の変形や損傷状態はねじりモーメントの影響を受け、応力が偏在することが解析的にわかった。

**キーワード**：立体フレーム、柱梁接合部、直交梁、スラブ、3 次元解析、FEM

## 1. はじめに

実構造建物中の各部材の挙動は周辺部材が相互に連動し合うため、部材単体の挙動とは異なると考えられる。フレーム中の柱梁接合部はスラブや直交梁の拘束効果によるねじりなどの影響を受けると考えられるが、部材単体の実験や解析では各部材の相互関係を十分に把握することは難しい。

本研究では、接合部周辺の境界条件を実建物になるべく近づけた立体 2 層フレームの 3 次元 FEM 解析を行い、スラブ・直交梁の周辺部材による柱梁接合部への影響や柱と梁の偏心接合の影響について検討する。また、試験体の数の制限から実験が行われてない偏心の有無やスラブ・直交梁の有無などをパラメータとした仮想試験体を作成して正負繰り返し解析を行い、破壊性状や変形、応力状態、ひび割れ状況などの解析結果からねじりによる耐力低下を検討する。

## 2. 解析概要

## 2.1 解析対象試験体

広沢ら<sup>1)</sup>により実験が行われた直交梁とスラブの取り付け柱梁接合部立体架構 2 層試験体

を解析対象とした。この試験体は中高層 RC 造建物を想定し、スラブおよびその周辺の架構部分を取り出しており、実際の 1/2 スケールで設計されている。柱せい 300mm、梁幅 180mm に対し軸心間距離  $e$  は 60mm である。試験体の断面形状および配筋を図-1 に示す。実験では試験体規模が大きいため、同形状の片側直交梁およびスラブ付き柱梁接合部架構 2 体を作成し、試験場で 2 体の各階スラブの端部付近に PL9mm を上下に 1 枚ずつ配置して高力ボルト接合で一体化している。

実験の加力方法は、応力度( $\sigma_0=1.97\text{MPa}$ )の圧縮軸力を一定保持し、その後加力梁の両外側端部に正負繰返し荷重が与えられた。1 階柱と 2 階柱の反曲点位置はピン支点とされた。加力サイクルは第 1 サイクルで柱せん断力 $\pm 46\text{kN}$ を荷重制御で与え、以降は層間変形角  $R=1/200, 1/100, 1/50$  においてそれぞれ正負各 2 回、 $R=1/25$  で正負各 1 回の繰返し載荷が行われた。

試験体の破壊モードは、柱梁接合部破壊が先行することを目的として接合部せん断余裕度を 0.7 としているが、実験結果では梁曲げ降伏が先行した。

\*1 (株) 富士通システムソリューションズ (前千葉大学大学院生) 工修 (正会員)

\*2 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 助手 工修 (正会員)

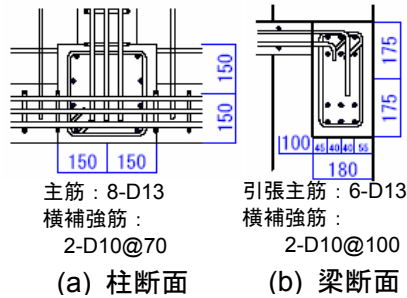
\*3 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 教授 工博 (正会員)

表-1 仮想試験体一覧

		直交梁・スラブ	
		有	無
偏心量	0mm	S0	N0
	60mm	S60	N60

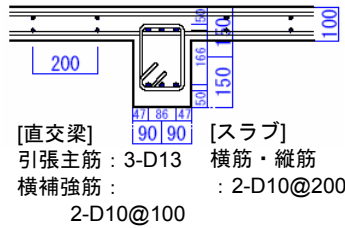
表-2 材料特性

コンクリート		
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
2.6	28	19300
鉄筋		
種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
主筋	378	180000
横補強筋 スラブ筋	347	180000



(a) 柱断面

(b) 梁断面



(c) スラブ・直交梁断面

図-1 試験体断面詳細

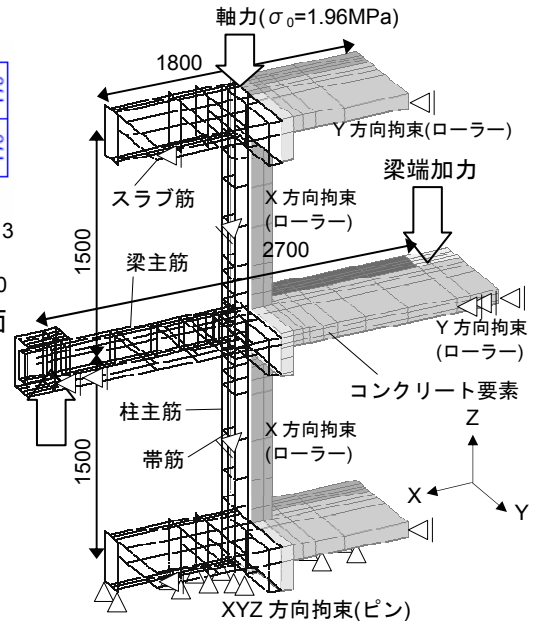


図-2 要素分割と境界条件

## 2.2 仮想試験体

広沢ら<sup>1)</sup>による実験試験体の他に、偏心の有無や直交梁およびスラブの有無を変動因子としたパラメータ解析を行う。仮想試験体一覧を表-1に示す。

## 2.3 解析モデル

本解析では、当研究室で櫻井、余、柏崎、野口<sup>2)3)</sup>らにより開発された繰り返し載荷モデルを導入した3次元FEMプログラムを使用した。コンクリートは8節点を有するアイソパラメトリックソリッド要素で表現し、コンクリートの破壊条件については、Kupferらの実験に基づくWillam-Warnkeの5パラメータモデルを用いた。3軸応力下でのひび割れモデルには単調載荷解析では余ら<sup>3)</sup>による多方向固定ひび割れモデル、繰り返し載荷解析では回転ひび割れモデルを用いた。ひび割れ直交方向の引張剛性 (Tension Stiffening 効果)については、白井式<sup>4)</sup>を用いた。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には、野口・飯塚式<sup>3)</sup>を用い、ひび割れ面に沿ったせん断剛性には Al-Mahaidi モデル<sup>5)</sup>を用いた。鉄筋は2節点線材トラス要素で表現し、応力-ひずみ曲線は、Ciampiらによって提案された修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とした。プログラムで用いられている各モデルの詳細は参考文献<sup>3)</sup>

を参照されたい。

解析で使用した材料特性を表-2に、要素分割と境界条件を図-2に示す。図-2では右側にコンクリート要素、左側に鉄筋を表示した。実験では2体の片側直交部材付き架構を接合して一体化しているが、解析では対称性を利用して1体のみを解析範囲とし、各階のスラブ位置で鉛直面ローラー拘束する。1階柱脚でXYZ方向変位を拘束し、実験と同様に各階柱の反曲点位置をX方向にピン拘束した。載荷方法については実験と同様に、まず柱頭に一定軸力を載荷した後、定軸力下で2階梁端部に逆対称の鉛直方向荷重を作用させることによってせん断力を載荷した。また、繰り返し載荷では実験と比較するため実験値と同変形量で除荷して振幅をそろえた。

## 3. 解析結果

### 3.1 荷重-変形関係

図-3に各試験体2階接合部における柱せん断力-層間変形角関係を示し、図-4に繰り返し載荷解析の正側加力の包絡線を示した。図-4中の□は梁主筋の降伏を示している。各試験体とも最大耐力前のほぼ同層間変形角において梁主筋が降伏した。実験の行われたS60試験体では、小変形時のループほど、履歴面積は小さめ

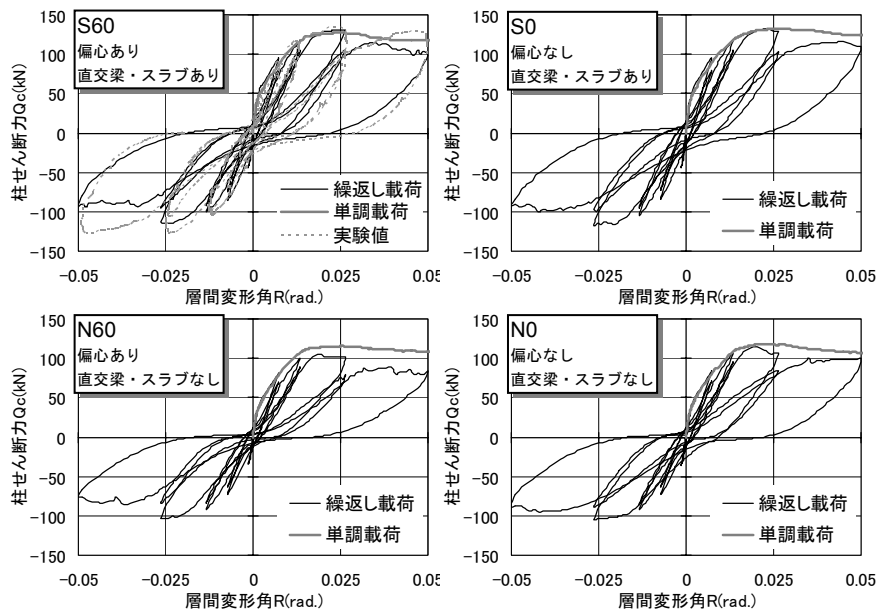


図-3 柱せん断力-層間変形角関係

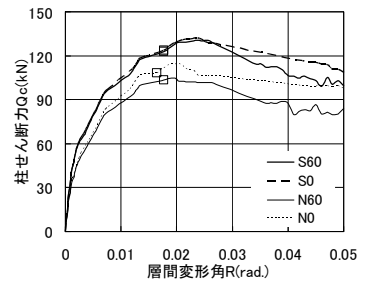


図-4  $Q_c-R$  包絡線

では直交梁とスラブの取り付いた試験体に比べ初期剛性が低く、さらに再載荷時の剛性が十分に復活しなかったため最大耐力も低い傾向となった。最大耐力は N60 試験体では

105kN, N0 試験体では 115kN となり、偏心接合の影響が確認できる。したがって直交梁やスラブが取り付いたことにより、偏心接合による耐力低下が緩和されたと考えられる。最大耐力後の耐力劣化は偏心試験体では 20~24%と無偏心試験体よりも劣化が大きい。

### 3.2 破壊状況

いずれの試験体も最大耐力に達する前に梁主筋が降伏する梁曲げ降伏先行型となった。S60 試験体では、第 2 ループから層間変形角  $R=1/100$  で柱主筋が曲げ降伏し、単調載荷時は  $Q_c=119kN$ , 繰返し解析では  $Q_c=123kN$  で梁端危険断面位置の下端筋が降伏して最大耐力に至った。接合部の圧壊は梁主筋降伏とほぼ同時期に生じた。梁端部の圧壊は層間変形角  $R=1/100$  で始まり、圧壊域はスラブのある梁圧縮部の上端よりも下端で広範囲に生じた。同様に S0 試験体でも圧壊域はスラブのない梁下端で広範囲に広がる傾向が見られた。

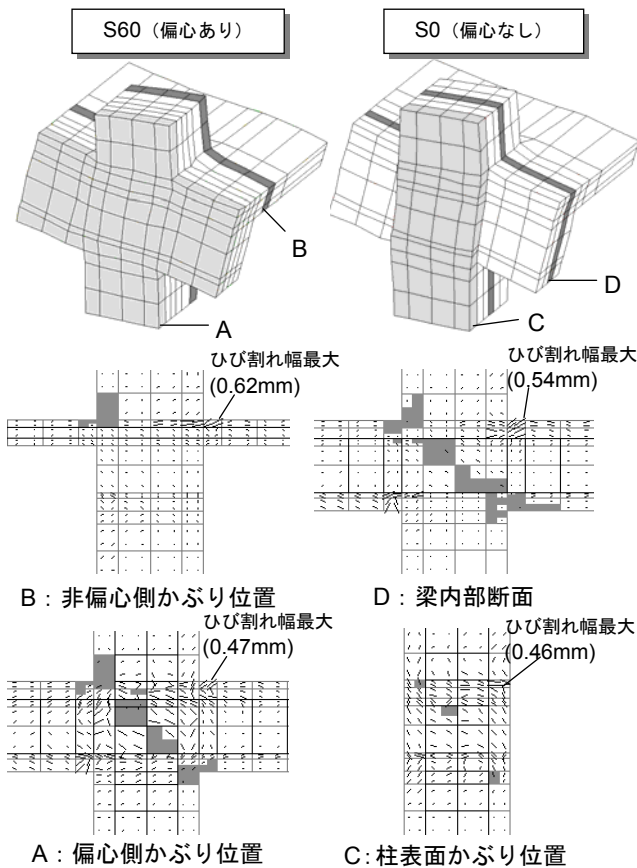


図-5 接合部損傷状況

の傾向となったが、実験結果と同様の逆 S 字型の履歴ループを描いた。最大耐力は 131kN(単調載荷時は 127kN)で実験値(134kN)と概ね対応している。S0 試験体の最大耐力は 132kN(単調載荷時は 132kN)となり、柱と梁の偏心接合の有無による顕著な差は生じなかった。N0, N60 試験体

図-5に直交梁、スラブの取り付いた S60 試験体と S0 試験体の層間変形角  $R=1/50$  における接合部の変形とひび割れ、圧壊状況を示す。図中のグレーの領域は圧壊コンクリートを示し、ひび割れ幅をひび割れ線の長さで表した。各積分点でのひずみが一軸圧縮強度時ひずみを超えるものを圧壊と定義する。ひび割れ線の長さは

各表示断面中での最大ひび割れ幅に対する相対量で表示した。

偏心接合の S60 試験体では偏心側接合部のかぶりコンクリート (A 断面) が圧壊し、ひび割れ幅も大きい。非偏心側の接合部のかぶりコンクリート (B 断面) は圧壊しておらず、ひび割れの開口も進展していない。一方、無心接合の S0 試験体の接合部かぶりコンクリートでは、せん断ひび割れは進展したが圧壊はあまり生じていないのに対し、梁内部ではひび割れ幅は大きくないが、梁端や柱頭、柱脚に至る広範囲で圧壊領域が広がった。直交部材なしの N0, N60 試験体でもほぼ同様の傾向が見られたが、N60 試験体の非偏心側接合部かぶりコンクリートは直交梁の拘束効果が得られないため、ひび割れ幅が拡大した。

### 3.3 梁主筋ひずみ分布

図-6 に各試験体梁危険断面位置の梁主筋ひずみ分布を示す。各試験体の降伏前のひずみ分布には顕著な違いは見られなかった。しかし降伏後は直交部材の取り付けしていない試験体 N60 および N0 では、上下主筋はほぼ同様のひずみ分布を示したのに対し、スラブの取り付けいた S60, S0 試験体では降伏後は上端筋に比べ下端筋ほどひずみが増大した。このことからスラブによる梁上端筋の変形の拘束が確認できた。

### 3.4 接合部せん断変形角

図-7 に各試験体の接合部せん断応力度-せん断変形角関係を示す。接合部せん断変形角は接合部主筋位置の水平、鉛直方向相対変位より求めた値である。正面 (偏心接合部における偏心側)、梁中心位置、背面 (直交梁取り付け側) での包絡線を示す。せん断応力度  $\tau$  は実験と同様に接合部入力せん断力を靱性保証型耐震設計指針<sup>6)</sup>による有効断面積で除して算出しており、位置による違いはない。

正面において、偏心試験体 S60, N60 は無偏心の S0, N0 に比べひび割れ後のせん断剛性が低く、偏心接合によるねじりモーメントの影響が現れている。直交部材や偏心接合のない N0 試験体は

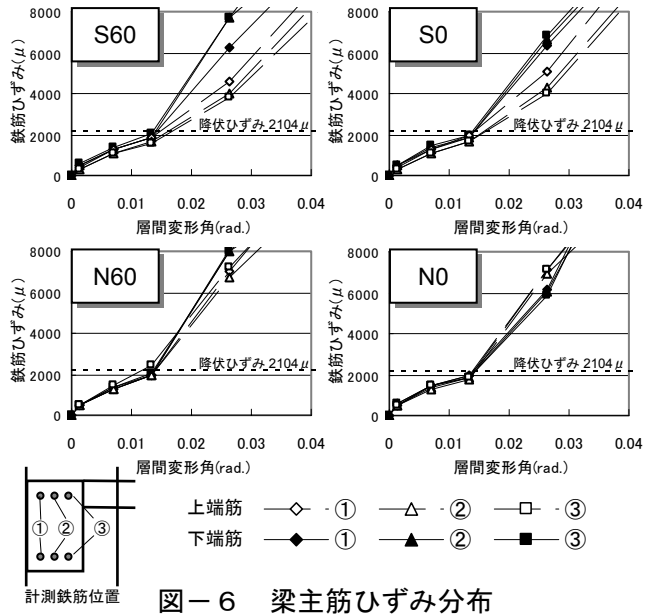


図-6 梁主筋ひずみ分布

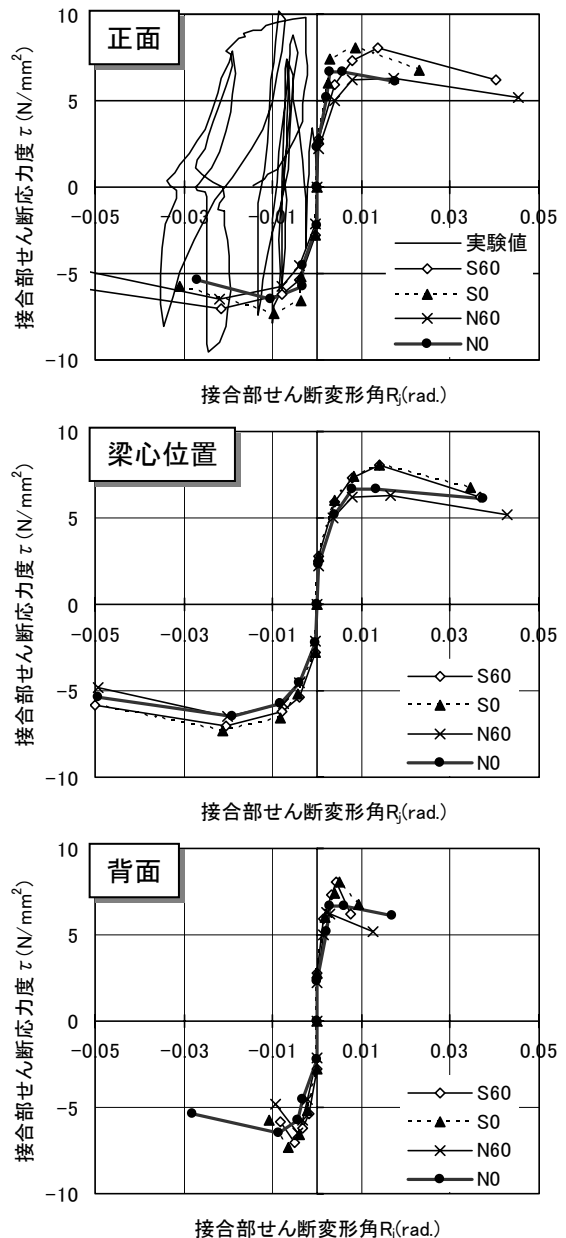


図-7  $\tau - R_j$  関係

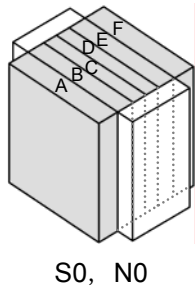
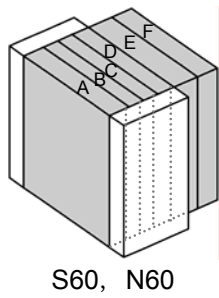


図-8 要素位置

正面と背面でほぼ同様のせん断変形が生じており、梁（柱）心を中心に対称的にせん断力が分布していると考えられる。ところが、直交部材の付いた無偏心試験体S0では正面よりも背面の変形量が小さく、直交梁の拘束効果が確認できた。一方、偏心試験体では偏心側（正面）ほど変形量が大きく、ねじりモーメントの影響を受けてせん断応力が偏心側接合部に集中して流れている。

また、指針<sup>6)</sup>により算出した接合部有効幅はいずれの試験体も同値となったが、せん断応力度は直交梁、スラブが取り付けられたことにより20%ほど大きくなった。

### 3.5 接合部内の累積吸収ひずみエネルギー

累積吸収ひずみエネルギーの定義を以下の式(1)により示す。要素の各積分点に対しての応力-ひずみ関係を積分し、その値に各積分点の負担体積を乗じ、累積吸収ひずみエネルギーを算出した。

$$\Delta U = \int_V \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_j} \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} \cdot dV \quad (1)$$

$$U = \sum \Delta U$$

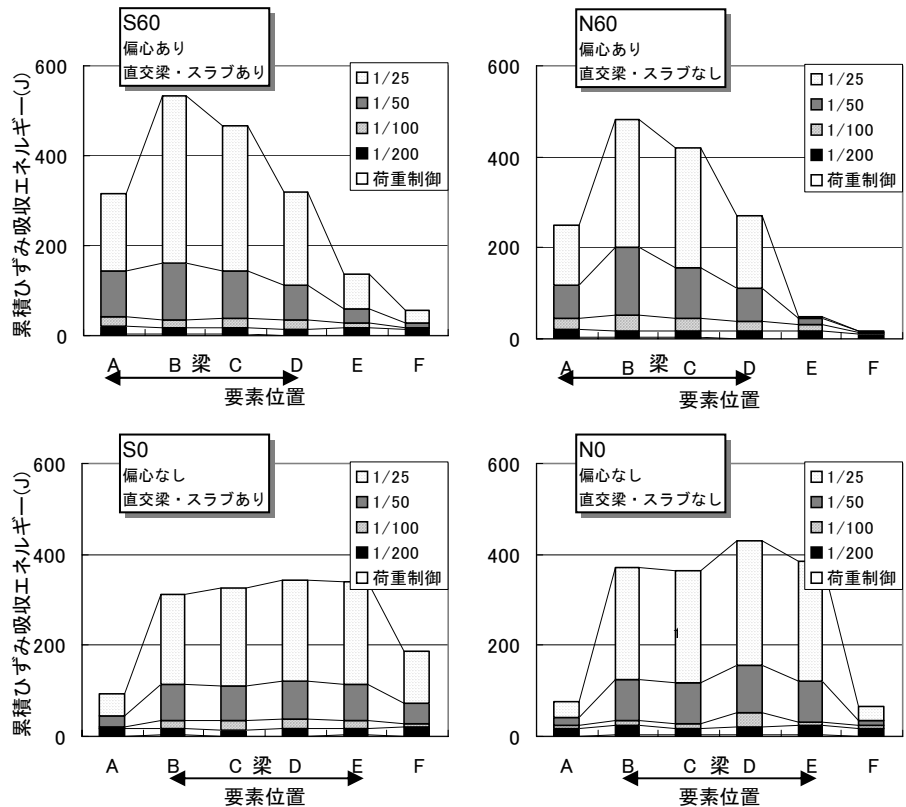


図-9 接合部累積吸収エネルギー分布

なお、式(1)の記号は、 $U$ ：累積吸収ひずみエネルギー、 $V$ ：要素体積、 $\sigma_{ij}$ ：微小区間の平均応力、 $\varepsilon_{ij}$ ：ひずみ増分である。

接合部内コンクリートのエネルギーを図-8に示した要素位置ごとに分割して求めたのが図-9である。

S0, N0 試験体（偏心なし）の梁取り付け位置のコンクリート要素のひずみエネルギーはほぼ一様に分布し、柱のかぶりコンクリート（図-8におけるAとF）に比べ高いエネルギーを負担している。しかしS60, N60の分布は梁取り付け部でも位置により差が生じている。層間変形角1/100までは、偏心側柱のかぶりコンクリート（A要素）が最もエネルギー吸収率が高く、特に損傷を受けていることがわかる。しかし、それ以降は変形が進むにつれ吸収率が減少している。また、直交梁の有無によって背面側接合部コンクリートのエネルギー吸収量に差が見られ、N0試験体では柱心を中心におよそ対称に分布しているが、S0試験体では直交梁と接する背面(F要素)のエネルギー吸収は正面(A要素)を上回り、N0試験体の約2倍となった。

表-3 耐力一覧

試験体名	偏心	直交梁・スラブ	梁降伏耐力					最大耐力								
			解析値 (kN)	M <sub>bu</sub> (kN)	解/計	<sub>s</sub> M <sub>bu</sub> (kN)	解/計	解析値 (kN)	実験値 (kN)	解/実	V <sub>ju</sub> (kN)	解/計	V <sub>ju</sub> ・β <sub>jt</sub> (kN)	解/計		
S60	有	有	122.9	108.0	1.14	167.9	0.73	130.8	134.1	0.98	112.6	1.16	102.1	1.28		
S0	無	有	123.6	108.0	1.14	167.9	0.74	132.2	/	/	112.6	1.17	/	/		
N60	有	無	103.4	108.0	0.96	/	/	104.8			112.6	0.93			102.1	1.03
N0	無	無	108.0	108.0	1.00			114.6			112.6	1.02			/	/

### 3.6 評価式による耐力の検討

表-3 に各試験体の梁降伏耐力と最大耐力の解析値と実験値および以下の評価式による計算値との比較を示す。

$$M_{bu} = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (2)$$

$$V_{ju} = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j \quad (3)$$

$$\beta_{jt} = \left\{ 1 + \left( \frac{e_t \cdot K_{ju}}{K_t} \right)^2 \right\}^{-0.5} \quad (4)^7$$

表中の値は全て柱せん断力に換算している。梁曲げ降伏耐力 M<sub>bu</sub> は梁断面のみから算出した値で、<sub>s</sub>M<sub>bu</sub> はスラブ筋を全て考慮して M<sub>bu</sub> に加えた値である。

S60, S0 試験体の梁曲げ耐力は M<sub>bu</sub> を上回るが <sub>s</sub>M<sub>bu</sub> を大幅に下回り、スラブ全断面を有効幅とすると耐力評価は適切とはいえない。靱性保証指針<sup>6)</sup>によるせん断強度 V<sub>ju</sub> によると、スラブや直交梁による耐力増加のない偏心試験体 N60 では解析値に対して比が 0.93 と若干下回り、危険側の評価となったが、広沢らによる偏心を考慮した低減率<sup>7)</sup> β<sub>jt</sub> を乗じることにより安全側の評価が可能となった。

### 4. まとめ

梁偏心接合の有無と直交梁、スラブの有無を変動因子とした立体フレームのパラメータ解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 直交梁やスラブが取り付くと梁が偏心接合したことによる最大耐力後の耐力低下などの全体挙動への影響は緩和された。
- (2) 直交部材の取り付けしていない偏心接合部のせん断耐力は靱性保証指針による評価では危険側となる可能性があり、偏心量を考慮した耐力評価が求められる。

- (3) 全体挙動に顕著な差が現れない場合でも偏心接合部においては接合部内部の変形や損傷状態はねじりモーメントの影響を受け、応力が偏在することが解析的にわかった。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、工学院大学・広沢雅也名誉教授、同・近藤龍哉助教授から、貴重な実験データを提供して頂きました。ここに記して深謝致します。

### 参考文献

- 1) 工藤祐也, 佐藤学, 近藤龍哉, 広沢雅也: 直交梁と直交スラブの付いた RC 柱梁接合部立体架構の破壊実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.535-540, 2003
- 2) 野口博, 櫻井輝雄ほか: 繰返し荷重を受ける RC 面材に関する非線形 FEM 解析モデルの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.139-144, 2002.7
- 3) 野口博, 余勇ほか: RC 構造部材の 3 次元繰返し載荷時の FEM 解析プログラムの開発(その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.67-70, 2004.9
- 4) 佐藤稔雄, 白井伸明ほか: 鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その 6), (その 7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1615-1618, 1978.9
- 5) Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, No.79-1, Dept. of Structural Engrg, Cornell Univ., Jan.1979 No.5, pp.32-100, Sep./Oct.1980
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 7) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計, 1998.10