

# [159] 地震力を受ける RC 柱・はり接合部の内部応力状態に関する解析的研究

正会員 野口 博 (千葉大学工学部)  
正会員 ○菅野 弘 (佐藤工業建築本部設計部)

## 1. はじめに

地震力を受ける鉄筋コンクリート(RC)柱・はり接合部のせん断抵抗機構については幾つかの見解があり、既往の研究では、これらの機構が単独、あるいは組み合わせられて議論されている。しかし、その機構が複雑なために未だ統一した知見は得られていない。このことを反映して、現在の米国ACI規準とニュージーランドRC規準の接合部規定の間には考え方にかなりの違いがみられる。また、日本建築学会RC規準では接合部の規定は設けられていない。

接合部に関する既往の研究は実験的なものが殆んどであるが、長沼らは繰り返し荷重を受ける柱・はり接合部の非線形有限要素解析を行い、層間変位や接合部変形の履歴ループ、はり主筋の付着すべり等について実験結果と良好な一致を得ている。<sup>1)</sup>

本研究では、既往の研究で有限要素解析が実験結果の検討に補足的に用いられている点<sup>2)</sup>を反省し、実験では把握しにくい内部応力の流れの変化やはり主筋の付着劣化過程について長沼らの解析結果を詳細に検討する。そして、はりの曲げ降伏後の正負繰り返し荷重による接合部コンクリートの圧縮ストラット機構等のせん断抵抗機構の変化を解析的に把握し、合理的な設計用マクロモデルの開発に役立てる事を目的とする。本研究での検討方法のフローチャートを図-1に示す。

## 2. 試験体の概要

解析が行われた試験体は、実大の約1/2スケールの十字形試験体(3体)で、直交はりはなく、はり主筋は接合部内で通し配筋されている。J-1は浜田ら<sup>3)</sup>により実験が行われた接合部破壊型の試験体で、J-2は多田ら<sup>4)</sup>によるはり曲げ降伏・付着劣化型である。J-3はJ-2の接合部内の付着特性を完全弾性とし、接合部からのはり主筋の抜け出しを完全に防いだり曲げ降伏・付着劣化防止型である。試験体の諸元及び解析での要素分割図を、それぞれ表-1、図-2に示す。

解析方法及び材料モデルについての説明は文献1)で詳述されているので省略する。なお解析結果はJ-1は第1サイクル負荷重のピーク、J-2

表-1 試験体諸元

Specimen	J-1	J-2・J-3
Beam		
Top&Bottom Rebars	3-D22	3-D16
at(cm <sup>2</sup> )	11.61	5.96
pt(%)	2.32	1.19
Stirrups	2-φ9	2-φ9
spacing(cm)	10.0	15.0
pw(%)	0.64	0.42
Column		
Total Rebars	8-D22	8-D16
ag(cm <sup>2</sup> )	30.96	15.92
pg(%)	3.44	1.77
Hoops	2-φ9	2-φ9
spacing(cm)	6.0	10.0
pw(%)	0.71	0.42
Axial Load (ton)	36.0	45.0
Connection		
Hoops	2-φ9	2-φ9
Sets&Space(cm)	3@6.0	5@6.0
aw(cm <sup>2</sup> )	3.82	6.35
pw(%)	0.58	0.98

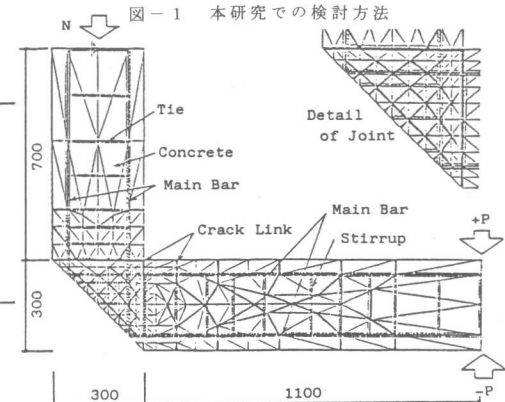
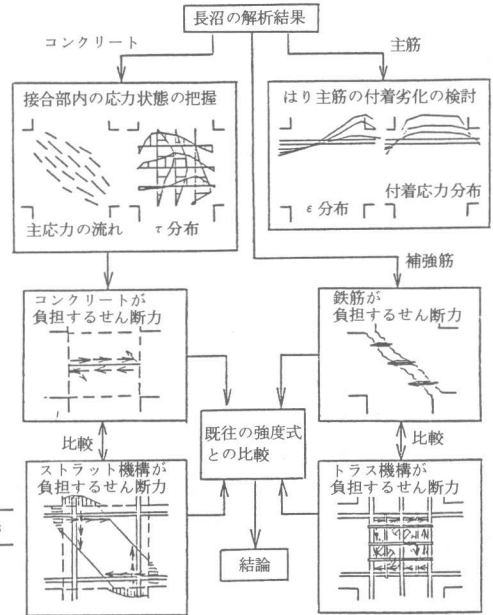


図-2 要素分割

及び J-3 は第3サイクル正荷重終了までを対象とした。

### 3. 主応力分布

図-3に接合部コンクリート

ート節点の主応力分布を示す。図中、実線は圧縮、破線は引張応力である。また、「B」は付着破壊、「Y」は鉄筋降伏を、「O」はそれ以後の状態を表す。3体ともはり端荷重の増加に伴い主応力方向が45°に近づき、中央対角線上に圧縮ストラットが形成されている。3体を比較すると J-1 は、はり付根や接合部でのコンクリートの圧壊（図中の○印は応力-ひずみ曲線の最大圧縮応力後の下降部分、○印はひずみが一軸圧縮強度時のひずみの4倍を越えた部分）が著しく、J-2及びJ-3でははり圧縮側に圧壊が集中している。J-2とJ-3で付着の違いをみると、サイクルが進むにつれて J-2 はストラットの幅が小さくなり、応力が中央に集中していくのに対して、J-3 はストラットの形状が明確ではなく、接合部全体に応力が流れている。特に第3サイクルのピークでは、中央部よりも周辺部での応力が高い。

#### 4. 鉄筋とコンクリートの負担せん断応力

##### 4-1 コンクリートの負担せん断応力

コンクリートが負担するせん断力は、接合部水平断面でのコンクリート節点のせん断応力を積分し、補強筋のトラス作用としてのコンクリートの反力を差し引いて求めた。計算結果を  $F_c$  の係数として図-4に示す。全般に J-3の方が J-2よりも大きめとなっているが、これは3章で述べたように J-3 ははり主筋の付着力によって圧縮力が接合部全体に流れているためである。繰り返しによる  $\tau_c$  の減少は、最終サイクルで J-2 の35%に対して、J-3 は25%と小さい。

既往の接合部強度式で、接合部の終局強度  $\tau_{ru}$  を、 $\tau_{ru} = \tau_c + \tau_s$  の累加強度形式で表すものを解析結果と比較して表-2に示す。既往の式では  $\tau_c$  を  $F_c$  に関する一次式ではなく、二次式として扱っているものが多く、評価も研究者の間で若干異なっている。ACI-ASCE 352式のコンクリート負担分が極端に小さいが、この  $\tau_c$  項は接合部のせん断ひび割れ強度と同一となっているためである。また、はり降伏を前提としていない上村式は、J-2、J-3との対応は良好ではないが、J-1とはほぼ一致している。また、小倉ら<sup>5)</sup>の研究では、 $\tau_s$  を  $\tau_s = P_w \cdot s_{oy}$  とみなすとコンクリートの負担項  $\tau_c$  は  $0.2 \sim 0.4 F_c$  とした範囲内でほぼおさまるとしている。今回の解析では、接合部破壊型の J-1 は  $0.47 F_c$  と小倉らの研究の上限をやや越えており、はりの曲げ降伏先行型で接合部としては安定している J-2、3 は  $0.12 \sim 0.25 F_c$  となっている。

##### 4-2 鉄筋の負担せん断応力

接合部のせん断補強筋のひずみから求めた鉄筋の負担せん断応力を  $P_w \cdot s_{oy}$  の係数として図-5に示す。低荷重で残留しているひずみ（図中の白丸印）をひびわれの局部接触等により生ずる補強筋の拘束効果と考えて、その影響を除いたものも併せて示した。

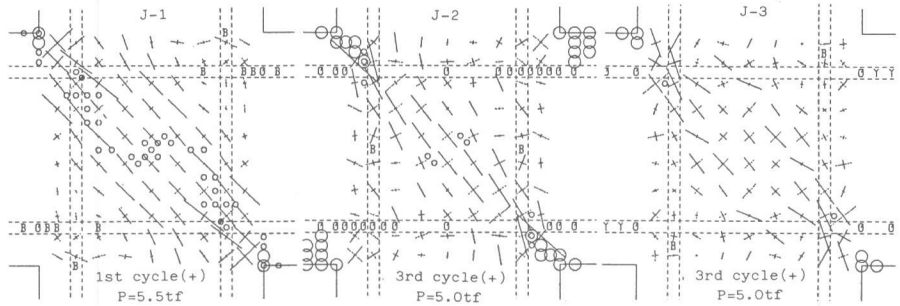


図-3 主応力分布

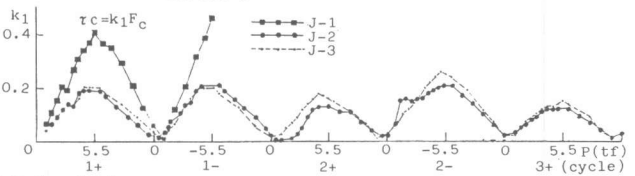


図-4  $\tau_c$  (コンクリート負担) の比較

表-2 既往の強度式との比較 単位 (kgf/cm²)

試験体	J-1		J-2		J-3	
	コンクリート	鉄筋	コンクリート	鉄筋	コンクリート	鉄筋
上村式*1	91.6	9.3	95.1	16.0	95.1	16.0
是石式*2	59.7	11.7	60.9	15.3	60.9	15.3
ACI-ASCE 352*3	19.1	18.6	23.1	32.2	23.1	32.2
SRC標準のRC負担*4	59.2	13.9	71.1	23.4	71.1	23.4
解析	92.6	10.1 (7.5)	35.1	26.0 (6.6)	42.8	17.9 (6.6)

カッコ内は拘束効果を考慮した場合

\*1 上村式  $\tau_{ru} = (0.78 - 0.0016F_c)F_c + 1/2P_w s_{oy}$  ( $F_c \leq 244$ )  
 $\tau_{ru} = 95.1 + 1/2P_w s_{oy}$  ( $F_c > 244$ )

\*2 是石式  $\tau_{ru} = (0.50 - 0.001F_c)F_c + 2.7P_w s_{oy}$  ( $F_c \leq 420$ )

\*3 ACI-ASCE 352委員会式  $\tau_{ru} = 0.928\beta_r \sqrt{F_c(1 + 0.028\sigma_o)} + P_w s_{oy}$  ( $\sigma_o \leq 0$ )  
 $\tau_{ru} = P_w s_{oy}$  ( $\sigma_o > 0$ )

\*4 SRC標準のRC負担項  $\tau_{ru} = 2fs\psi + P_w vft$

今回の解析では拘束効果を考慮しない場合 J-1、2、3 が最終サイクルでそれぞれ 0.53、0.83、0.58  $P_w \cdot s \sigma_y$  となっており、考慮した場合は 3 体で大きな違いはなくそれぞれ 0.39、0.21、0.21  $P_w \cdot s \sigma_y$  となっている。

### 5. 圧縮ストラット機構とトラス機構の負担せん断応力

Park、Paulay<sup>6)</sup>は、接合部のせん断抵抗はコンクリートの圧縮ストラット機構とせん断補強筋のトラス機構の共存によるとしてニュージーランドでの接合部規定を定めている。ここでは FEM データからストラット機構とトラス機構による負担分を計算し、繰り返し荷重や付着性状の影響を検討する。

#### 5-1 圧縮ストラット機構の負担せん断応力

圧縮ストラット機構が負担する水平せん断力  $V_{ch}$  は次式による。

$$V_{ch} = {}_B C_c + \Delta_B T_c - V_{c01} \quad (1)$$

ここで、 ${}_B C_c$  : はり付根コンクリートの圧縮力  
 $\Delta_B T_c$  : ストラット域のはり主筋の付着力  
 $V_{c01}$  : 柱のせん断力

右辺のうち、 ${}_B C_c$  ははり主筋の応力から間接的に圧縮鉄筋と引張鉄筋の合力の差として求めた。 ${}_B C_c$  の変化を図-7 に示す。J-2 は圧縮鉄筋が引張となるため、コンクリートだけが圧縮力を負担し、 ${}_B C_c$  は増大する。J-3 は引張への転化がなく、サイクルが進むにつれて塑性ひずみが大きくなり、圧縮側のひびわれが閉じるまではすべての圧縮力を鉄筋だけが負担するため、ひびわれの閉じるピーク付近を除いて零となっている。

4章で求めたコンクリートの負担せん断応力と、式(1)による圧縮ストラットの負担分の各サイクルピークでの比較を図-8 に示す。両者を比べると、接合部破壊型の J-1 は非常によく一致している。はり降伏型の J-2、J-3 は 0.15~0.20  $F_c$  とやや低めながら概ね対応しており、本研究ではコンクリートの負担分と圧縮ストラット機構による負担分はほぼ一致している。

#### 5-2 トラス機構の負担せん断応力

トラス機構の負担水平せん断力  $V_{sh}$  は次式による。

$$V_{sh} = \Delta_B T_s \quad (2)$$

ここで、 $\Delta_B T_s$  : ストラット域外のはり主筋の付着力 (図-6 参照)

結果を4章の鉄筋による負担分と共に図-9 に示す。両者を比較すると、

トラス機構による負担分は J-1 では大きく、J-2 では拘束効果を考慮した場合としない場合の中間、J-3 では考慮した場合に近い。このように鉄筋の負担分は、トラス機構で正しく評価されている。

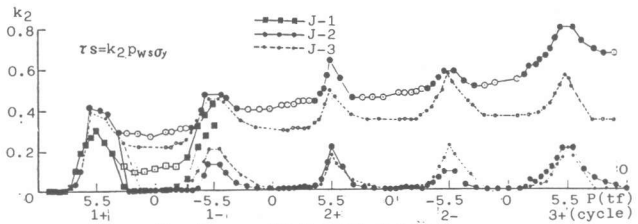


図-5 rs (鉄筋負担) の比較

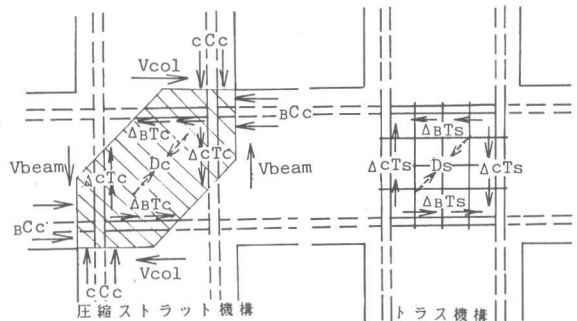


図-6 Park、Paulay による接合部せん断抵抗機構

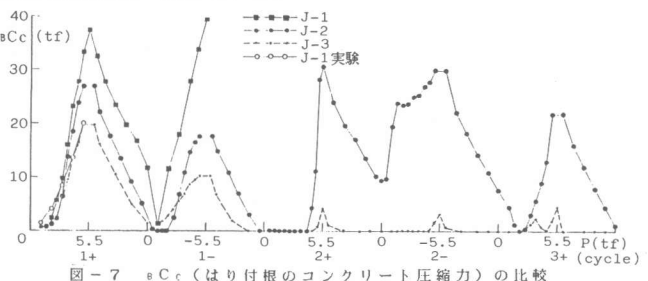


図-7  ${}_B C_c$  (はり付根のコンクリート圧縮力) の比較

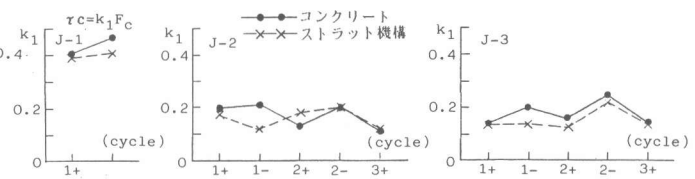


図-8 コンクリート負担とストラット機構負担の比較

ない。これは、今回の試験体にはトラスを形成する際に必要となる鉛直方向の引張材(縦方向の補強筋や柱中段筋)がないためではないかと考えられる。

### 6. 示力図

式(1)、式(2)と同様に鉛直方向の負担分を求め(式(3)、式(4))、接合部に作用する力のつりあいから示力図を描いた。

(図-10) すなわち、

$$V_{cv} = c_c C_c + \Delta c T_c - V_{beam} \quad (3)$$

$$V_{sv} = \Delta c T_s \quad (4)$$

ここで、 $V_{cv}$ : ストラット機構が負担する鉛直せん断力  
 $V_{sv}$ : トラス機構が負担する鉛直せん断力  
 $c_c C_c$ : 柱付根のコンクリートの圧縮力  
 $\Delta c T_c$ : ストラット域の柱主筋の付着力  
 $V_{beam}$ : はりのせん断力  
 $\Delta c T_s$ : ストラット域外の柱主筋の付着力 (図-6参照)

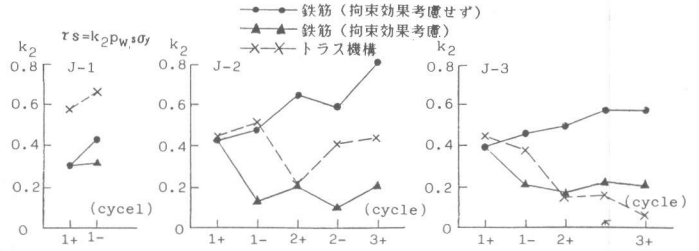


図-9 鉄筋負担とトラス機構負担の比較

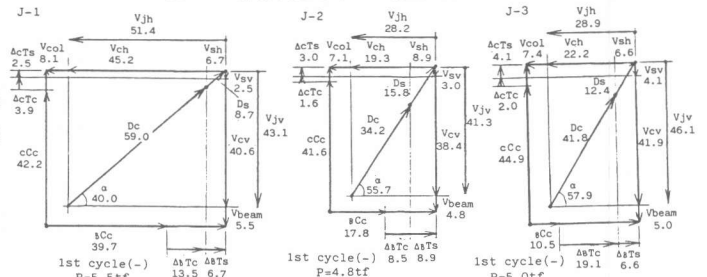


図-10 示力図 単位(tf)

Parkらが指摘したように  $V_{cv}$ の一部が鉛直方向補強筋の代わりとしてトラス機構を形成している。 $V_{ch}$ の成分は付着を通常とした J-2 ははり付根のコンクリートの圧縮力 ( $B C_c$ ) が、付着を良くした J-3 はストラット域の付着力 ( $\Delta B T_c$ ) がそれぞれ支配的となっている。

### 7. むすび

本研究の成果を要約すると、以下のようになる。

- 1) 付着が良好な場合には、圧縮鉄筋の引張への転化はみられず、付着力によって圧縮応力は接合部全体を流れる。
- 2) 接合部破壊型のコンクリート負担せん断応力は、 $0.47 F_c$ 、はりの曲げ降伏型で  $0.15 F_c$ 程度でありその値は圧縮ストラット機構による値とほぼ一致する。
- 3) 鉄筋の負担せん断応力は、拘束効果を考慮しない場合接合部破壊型は  $0.5 P_w \cdot \sigma_{sy}$ に近く、曲げ降伏型は  $0.5 P_w \cdot \sigma_{sy}$ と  $P_w \cdot \sigma_{sy}$ の中間の値である。

いずれも接合部耐力には達していないが、それに至る過程の負担分として評価できる。トラス機構の妥当性については、縦方向の補強筋や柱中段筋の検討が今後必要である。

本研究での FEM 解析データによる内部応力状態の検討方法は、今後系統的な解析を行うことにより接合部のマクロモデルの検証及び開発のための有力な一手段となると思われる。

【謝辞】 本研究は文部省科学研究費(総合研究(A))：課題番号58350035、研究代表者：青山 博之)を受けて行ったものであり、ここに深謝致します。

参考文献 1)長沼 一洋 「地震時応力を受ける鉄筋コンクリート柱・はり接合部に関する解析的研究」、千葉大学学位論文、昭和57年度

2)Aoyama, H. and Noguchi, H., "Future Prospects for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures - A Compilation of Questionnaire Results from JCI-RCFEM Committee Members -", Proc. of Japan/U.S. Joint Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Vol. 2, May 1985, pp.163-176

3)浜田 大蔵、上村 智彦、林 正司、「鉄筋コンクリート構造物の梁・柱接合部に関する実験的研究(その1~その3)」、日本建築学会大会、昭和53,54

4)多田 利正、武田 寿一、竹本 靖、「RC柱・はり接合部の補強法に関する実験的研究(その1~その5)」、日本建築学会関東支部研、昭和51~52年

5)小倉 弘一郎、関根 正孝、「鉄筋コンクリート柱・はり接合部に関する研究の動向」、コンクリート工学 Vol. 19, No. 9, Sept. 1981

6)T. Paulay, R. Park, 「Joints in Reinforced Concrete Frames Designed for Earthquake Resistance」、A Report Prepared for a U.S.- New Zealand - Japan Seminar, 1984