

論文

[2208] 柱 RC・梁 S を用いた混合構造柱梁接合部のせん断性能に関する解析的研究

米澤健次*1・野口 博*2

1. はじめに

近年、日米共同研究においてハイブリッド構造に関する研究が始まり、柱 RC・梁 S で構成される混合構造接合部に関する研究が、各研究機関で活発に行われ、様々な接合形式が提案され、その妥当性や応力伝達機構の解明のため、実験が数多く行われている。

しかし、研究の方法としては、主に実験に基づくものが殆どであり、混合構造接合部のせん断抵抗機構および支圧抵抗機構等に関しては、概念的なものが多く、内部応力伝達機構の考察に基づいた評価は十分に成されていないのが現状である。

本研究では、主に混合構造接合部における解析手法の確立を目指し、応力伝達機構を解析的に明らかにすることを目的として、既往の実験試験体を対象とした三次元非線形有限要素解析を行った。そこで、鋼板とコンクリート間の応力伝達機構を接合要素を用いて表現し、既往の実験結果との比較を行った上で、解析モデルの妥当性及び、混合構造接合部の応力伝達機構の検討を行った。

2. 解析プログラム

近年、計算機の容量及び、計算速度は飛躍的な進歩をとげ、三次元の非線形有限要素解析を用いた研究[1]も行われ始めている。混合構造接合部では、柱幅と梁幅が大きく異なり、応力の流れは三次元的な広がりを見せることが推察され、解析では、接合部ディテールをできる限り実状に即した形状で再現することが重要と考えられる。

有限要素解析では、適切な要素種類の選択や、要素分割方法に関する統一的な指針は、得られておらず、計算機のハード面での制約により決定される場合が多いのが実状である。

単純な形状の部材であれば、高次の内挿関数を有する要素（高次要素）により、比較的粗い要素分割として取り扱うことができるが、混合構造接合部のようにディテールや、配筋が複雑であるものは、低次の内挿関数を有する要素（低次要素）の方が取り扱いが容易である。

そこで、本研究では、混合構造接合部の挙動を精度良く追跡するために、内田、雨宮、野口等によるプログラム[2]を基に、低次要素、および接合要素を有する三次元有限要素解析プログラムの開発を行った。

3. 解析対象試験体

表-1 に試験体概要を示す。解析対象試験体は、既往の柱 RC・梁 S で構成される柱梁接合部の実験から、十字型骨組試験体 3 体(S-2, N0.2, H-D10-5)を選んだ。3 体ともに直交梁を有しており、S 梁が RC 柱を貫通するだけで、接合部内はせん断補強筋のみで補強されており、他に特別な補強が行われていない基本的な試験体である。3 体とも、実験時にパネルのせん断破壊と判断されたものである。一例として図-1 に S-2 の試験体配筋図を示す。

また、S-2 試験体について、比較のため鋼板とコンクリートが完全付着であると仮定した解析(S-2PB) も行った。

*1 千葉大学大学院 自然科学研究科、工修（正会員）

*2 千葉大学工学部建築学科、教授、工博（正会員）

表-1 試験体概要

	S-2	NO. 2	H-D10-5
L, H	400cm, 300cm	300cm, 200cm	400cm, 180cm
S 梁断面	H-400x150 x9x19	H-350x100 x6x19	H-300x150 x6.5x9
柱断面	45cm×45cm 主筋12-D19 Hoop4-U6.4@50 $\sigma_B=301\text{kgf/cm}^2$	40cm×40cm 主筋12-D19 Hoop4-8φ@50 $\sigma_B=303\text{kgf/cm}^2$	35cm×35cm 主筋12-D19 Hoop 2-D10@75 $\sigma_B=278\text{kgf/cm}^2$
接合部	4-D6@50 $\sigma_B=334\text{kgf/cm}^2$	2-D6@25 $\sigma_B=303\text{kgf/cm}^2$	2-D10@50 $\sigma_B=278\text{kgf/cm}^2$
文献番号	坂口等 [3]	毛井等 [4]	小澤等 [5]

L: スパン、H: 階高、 σ_B : コンクリート強度

実験時の加力は、3体ともに柱頭部に一定軸力を加え、正負交番繰り返し載荷を行っている。

4. 解析方法および解析モデル

図-2に、要素分割図を示す。形状は対称性を利用してS梁の中心線から半分のみを対象として要素分割を行い、柱の側面を面ローラー支持とした。解析は、柱頭部に一定軸力を加えた後に、梁端部に強制変位を与えた。

なお、実験は、正負交番載荷を行っているが、計算量節減のため、単調載荷解析とした。

以下に本解析での材料モデルの特徴を示す。

コンクリート要素：8節点ソリッド要素を用い、コンクリートは直交異性体とし、Drawin・Pecknold等の等価一軸ひずみモデル[6]を、Murray等[7]が三次元に拡張したものを使用した。破壊曲面には、Willam-Warnkeの3パラメータモデル[8]にさらに二つの自由度を加えた5パラメータモデル[9]を用いた。なお、5つのパラメータは、Kupfer[10]の平板実験の結果を用いて決定した。また、最大強度までの応力ひずみ関係にはSaenz式[11]を用い、最大強度以降に関して、接合部内コンクリートのせん断補強筋による拘束効果を、Parkモデル[12]を用いて靱性の向上を考慮した。コンクリートのポアソン比は、圧縮ひずみの関数で表現したKupfer等の提案式を用いた。ひび割れは要素の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。

ひび割れたコンクリートの圧縮劣化特性には、ひび割れと直交方向の引張ひずみの関数とした、野口等の提案式[13]を用いて、圧縮強度低減係数 λ を決定し、前述の5パラメータモデルにより決定された各応力状態における最大圧縮強度に λ を乗じて、考慮した。

プレート要素：4節点の平面シェル要素を用い、降伏判定にはVon Misesの降伏条件式を用い、完全弾塑性モデルを用いた。

鉄筋要素：2節点線材要素を用い、材軸方向のみに剛性を有する2節点線材要素を用いた。

接合要素：鋼板とコンクリート間の応力伝達および相互関係を表現するために、三次元接合要素を用いた。すべての鋼板とコンクリート間のすべての界面は、節点を別々に

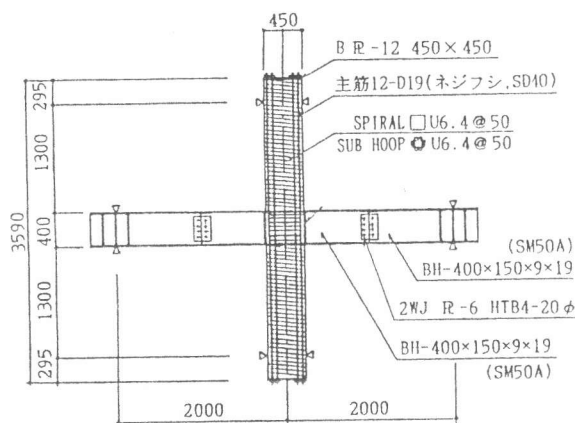


図-1 S-2配筋図

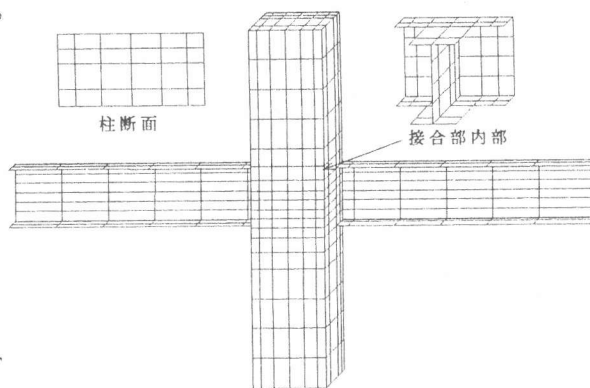


図-2 要素分割

表-2 接合要素材料定数

	S-2	NO. 2	H-D10-5
剛性 $G_n \times 1$ (kgf/cm^2)	24.0	24.0	24.0
摩擦係数	0.65	0.65	0.65
粘着強度*2 (kgf/cm^2)	12.0	12.0	12.0
厚さ $h(\text{cm})$	0.01	0.01	0.01

*1本研究の接合要素は境界面に対して平行方向のせん断剛性として表している。

*2 $0.04 \times F_c$

定義し、それぞれの節点に接合要素を設け、鋼板とコンクリートの間の開閉と滑りを表現した。材料定数は、プレートコンクリート構造の十字型柱の二次元有限要素解析[14]に用いた摩擦リンクの材料定数を三次元に置換し、用いた。本論で用いた接合要素の特性を、以下に示す。

①鋼板に対して垂直方向の開閉挙動 ($\sigma_t - S_t$) : σ_t が引張力を受ける場合には、約 $0.04F_c$ に達するまで線形を仮定し、それを越えたら応力を零として余剰応力を解放した。

σ_t が圧縮応力を受ける場合には、無限大の剛性を与え、線形を仮定した。

②鋼板に対して水平方向の応力—すべり関係 ($\sigma_h - S_h$) : 一定の剛性を与え、 σ_h が $0.04F_c$ に達するまで線形を仮定し、その後は、 σ_t が圧縮応力を受ける場合、一定の剛性のまま、摩擦係数を 0.65 とし、 $\sigma_h > 0.65 \cdot \sigma_t$ に達したら、 $\sigma_h = 0.65 \cdot \sigma_t$ として余剰応力を解放した。 σ_t が引張応力を受ける場合には、 σ_h を零とし、余剰応力を解放した。

ここで、摩擦係数及び粘着強度は、コンクリートに埋め込まれた H 形鋼の押し抜き試験[17]の結果を用いて決定した。なお、接合要素に用いた、各材料定数を表-2 に示す。(σ_t 、 S_t 、 σ_h 、 S_h は、図-3 及び 5 節参照、 F_c : コンクリート強度)

5. 接合要素の定式化

本研究では、山田、江澤等[15]による接合要素を参考にし、通常のソリッド要素の形状関数を用いた三次元有限要素解析に適用できる接合要素を開発し、鋼板とコンクリート間の相互関係を表現した。

通常のソリッド要素では、要素内の任意の位置に作用する応力は、面に垂直な方向の応力である 3 成分と、面に平行な方向のせん断応力である 3 成分 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) の合計 6 成分で、要素の力学特性を表す構成方程式を示している。本来、境界面に挿入する要素としては、厚さが極端に小さいため、その境界面に垂直方向の応力 (σ_t) と、境界面に平行方

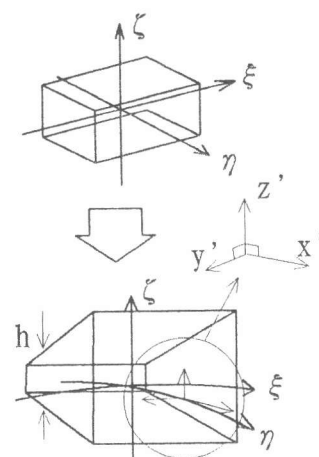


図-3 接合要素概念図

向の 2 成分のせん断応力 ($\sigma_{h1,2}$) の合計 3 成分のみで、剛性の評価等を行う方が簡便である。

図-3 に本研究で用いた接合要素の概念図を示す。図-3 に示すように、正規化パラメータ座標 (ξ, η, ζ) に関して、要素内任意の位置で ξ 軸の接線方向に x' 軸、 η 軸の接線方向に y' 軸をとり、 x' 軸と y' 軸に直交する方向 (x' 軸の方向ベクトルと y' 軸の方向ベクトルの外積) に z' 軸をとる。その局所座標系の各軸に関する応力マトリックス $\{\sigma\} = (\sigma_{h1}, \sigma_{h2}, \sigma_t)$ 、およびひずみマトリックス $\{S\} = (S_{h1}, S_{h2}, S_t)$ に対して、応力—ひずみ関係マトリックスとして前述の構成則 ($\{D\}$ マトリックス) を与えた (式(2))。ここで、節点変位—要素内ひずみ関係式 ($\{B\}$ マトリックス) に関しては、全体座標系と局所要素系の方向余弦マトリックス、及び形状関数を用い、厚さが極端に小さいため、 z' 方向の変位勾配についてのみに注目し、 $\{B\}$ マトリックスを作成した (式(1))。

上述のように厚さ無限小の要素では、剛性マトリックスの表示の分母に厚さ h が含まれているので、厚さの減少とともに、要素の剛性は無限大に近づき、方程式を解いて節点変位の解を求める際に、大きな誤差を生じる可能性があることが、既往の研究で指摘されている[16]。山田等は、この問題を回避するために、変換マトリックスを求める際に工夫を凝らしている。しかし、三次元問題に適用する接合要素においては、変換マトリックスが複雑になり、山田等の方法を適用す

$$\begin{bmatrix} S_{h1} \\ S_{h2} \\ S_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{h1}}{\partial z'} \\ \frac{\partial u_{h2}}{\partial z'} \\ \frac{\partial u_t}{\partial z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ 3 \times 3n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \\ w_n \end{bmatrix} \quad \text{--- (1) 式}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{h1} \\ \sigma_{h2} \\ \sigma_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{h1} & 0 & 0 \\ 0 & G_{h2} & 0 \\ 0 & 0 & G_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{h1} \\ S_{h2} \\ S_t \end{bmatrix}$$

$$\quad \quad \quad \parallel \quad \quad \quad \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \quad \text{--- (2) 式}$$

u_n, v_n, w_n : 全体座標系 x, y, z 方向の n 番目の増分節点変位

u_{h1}, u_{h2}, u_t : 要素内任意位置における局所座標系 x', y', z' 方向の増分変位

n : 要素の節点数

要素の力学特性を表す構成方程式

G_{h1} : x' 方向の剛性値 G_{h2} : y' 方向の剛性値
 G_t : z' 方向の剛性値

る事が困難であった。そこで、本研究の接合要素に関して、厚さ h がどの程度小さくなれば数値的な不都合が生じるのか、を確認するために、基礎解析を行った。その結果 $h=0.1\text{mm}$ までは、解は収束し、安定していることを確認した。その結果から本研究では、接合要素の厚さを 0.1mm と定義し、解析を行った。

本研究で用いた接合要素は、接触境界面に対して連続的な三方向のバネが分布しているものとイメージ的に考えられる。通常の RC 部材の解析に用いられる、それぞれの節点に直接バネを設けたボンドリンク等と比較して、境界面に対して、一様な応力場が形成され、要素分割に依存せず、三次元有限要素解析のように面と面との相互関係を表現するには適していると考えられる。

表-3 解析結果一覧

6. 解析結果

図-4 に各試験体の実験結果と解析から得られた層せん断力-層間部材角関係を示し、表-3 に解析結果一覧を示す。また、一例として図-5 に S-2 試験体の解析から得られた変形図を示す。S-2、H-D10-5 試験体の解析

	接合部内ウェブ降伏開始	接合部内フープ降伏開始	最大耐力		
			実験値	解析値	解析値 実験値
S-2	17.6	19.5	23.0	22.5	0.98
NO.2	21.1	22.2	22.4	23.4	1.04
H-D10-5	11.4	14.8	15.0	14.8	0.98

注) 表中の値は、すべて層せん断力に換算している。

結果は、実験結果と比べてやや剛性を大きく評価しているが、耐力は良い対応を示した。また、NO.2 の解析結果は、実験結果と比べて、耐力をやや大きめに評価しているが、剛性はほぼ一致している。鋼板とコンクリートが完全付着であると仮定した S-2PB は、剛性及び耐力を実験値と比べ、過大に評価しており、鋼板とコンクリート間の開閉およびすべりの有無が、部材全体の挙動に対して、大きく影響することがわかった。

S-2、H-D10-5 試験体に関して、解析値が実験値に比べ、剛性を過大に評価した理由として、計算機の記憶容量の制限から、柱をやや粗い要素分割にしたことなどが挙げられる。

三体ともに最大耐力に達する以前に接合部内のウェブが降伏した。変形図から梁、及び柱の変形に比べ、接合部が最も大きく変形していることがわかる。解析での破壊形式は、接合部内ウェブの降伏後、接合部内コンクリートの圧壊で耐力が決定され、実験結果と一致している。

以上のことから、鋼板とコンクリートの開閉およびすべりの考慮、および、本研究で仮定した諸解析モデルを用いることにより、ほぼ良好に実験結果を追跡することが可能であると判断した。

7. 接合部の応力伝達機構の検証

図-6 に一例として、各断面における最大耐力近傍の S-2 試験体の主応力の流れを示す。また、図中の黒点は、コンクリートの圧壊を示している。

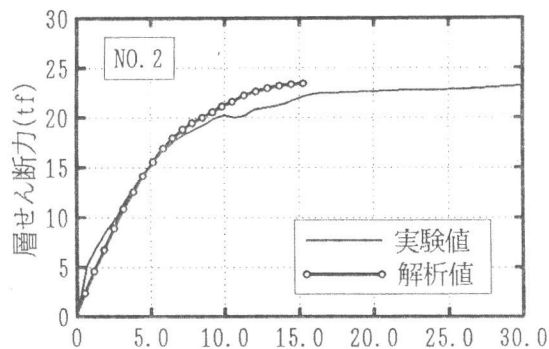
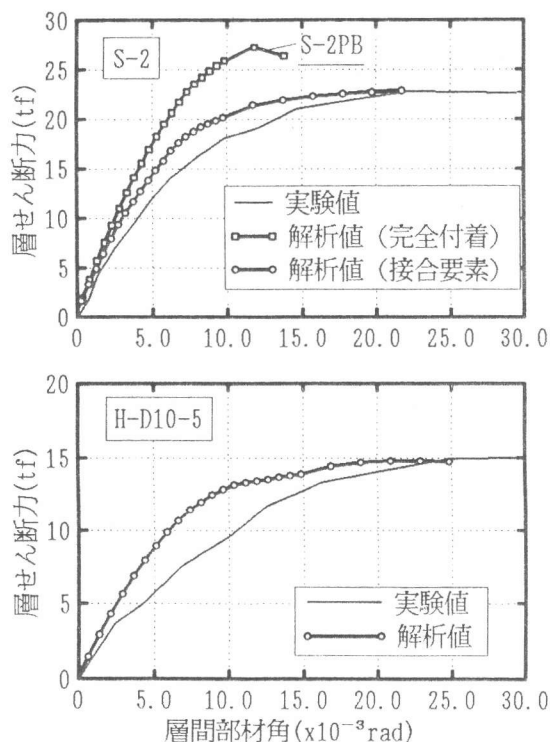


図-4 層せん断力一層間部材角関係

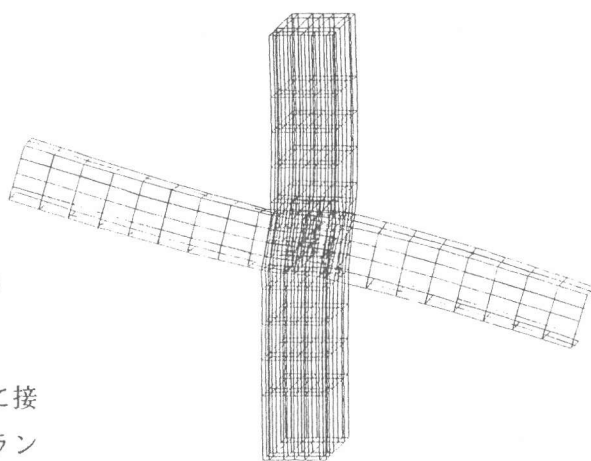


図-5 S-2変形図

接合部内梁フランジ（図-6、A-A'断面）に接する柱側コンクリートに圧壊がみられ、梁フランジのてこ作用によるめり込みが生じ応力が集中しているのがわかる。また、直交梁ウェブとそれに接するコンクリートの界面ですべりが生じているため、接合部内コンクリートは直交梁ウェブで2つに分断され、それぞれのコンクリートの中で、隅角部を結ぶ方向に主応力が流れており、その方向に圧縮ストラットが形成されているのがわかる。

接合部梁フランジ外断面（図-6、C-C'断面）では、接合部フランジ内断面(A-A')に比べ、柱部材端部のコンクリートの圧壊箇所が減り、かぶりコンクリートに若干みられる程度であった。また、直交梁ウェブの分断された、それぞれのコンクリートの内の隅角部、つまり圧縮ストラットの端部に圧壊がみられた。

解析結果の考察によれば、最終的には、接合部せん断破壊に至るが、支圧抵抗機構によるダメージがかなり大きかったことが推察される。他の2体(NO. 2, H-D10-5)の主応力部分布に関しても同様な傾向が得られた。

本研究の解析結果より、梁から柱への応力伝達は、鉄骨とコンクリートとの支圧により、行われ

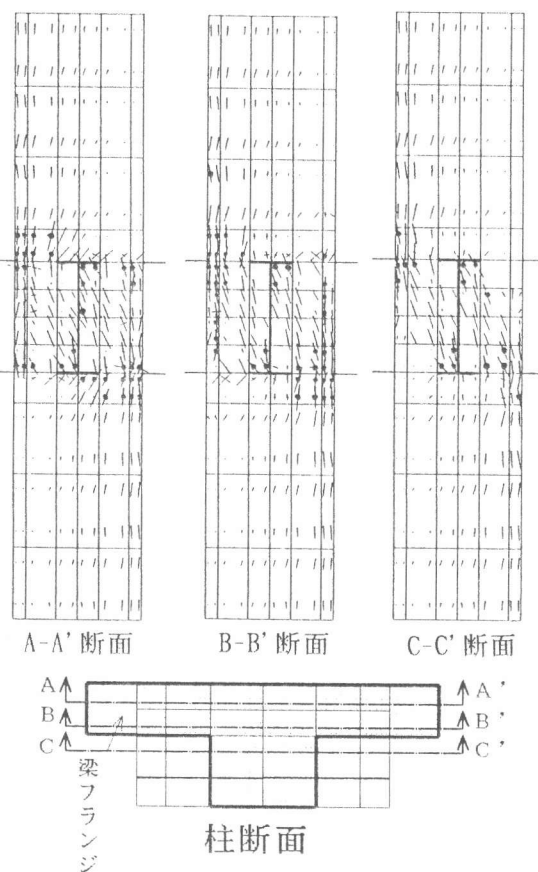


図-6 S-2主応力の流れ

ていることが考えられ、解析から得られた主応力の流れ図の圧壊状況から推察すると図-7に示すように、梁フランジ面、および直交梁ウェブ面の支圧により、行われていることがわかる。また、接合部のせん断抵抗機構に関しては、図-8にみられるように直交梁で分断されたそれぞれのコンクリート内の隅角部を結ぶ圧縮ストラットと接合部内ウェブが主なせん断抵抗要素と考えられる。直交梁の有無により、接合部内コンクリートに形成される圧縮ストラットの角度が異なり、直交梁の有無が接合部のせん断耐力に影響するものと考えられる。前述(図-7、図-8)の解析による検証により得られた応力伝達機構、およびせん断抵抗機構は、実験により得られた概念的[4]なものとも一致した。

8. まとめ

本研究では、柱RC・梁Sの混合構造接合部(梁貫通形式)における解析手法の確立を目指して、既往の実験試験体について三次元有限要素解析を行い、その応力伝達機構の検証を行った。本研究で得られた結論を、まとめて以下に示す。

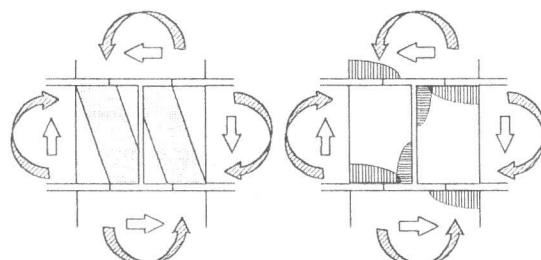


図-7 支圧抵抗機構 図-8 せん断抵抗機構

- 1) 本解析では、鋼板とコンクリート間に接合要素を用いて、その界面における開閉およびすべりを表現することで、実験結果を良好に追跡することができた。なお、鋼板とコンクリートの応力-すべり関係のモデル化に関しては、今後の課題である。
- 2) 鋼板とコンクリート間の界面に開閉およびすべりの有無が、全体の挙動に対して大きな影響を及ぼすことがわかった。
- 3) 梁貫通形式の混合構造接合部における応力伝達機構およびせん断抵抗機構を、解析的に考察を行い、検証することができた。
- 4) 今後、鋼板とコンクリートの界面における応力伝達のモデル化について、実験的に明確にし、三次元有限要素解析の精度の向上を図り、各接合部の補強方法による影響、接合部せん断有効体積の評価、補強方法による支圧抵抗機構の違い、および各せん断抵抗要素の負担割合等、実験では得ることの難しい項目を、解析結果を基に検討していく必要がある。

【謝辞】本研究は、日米共同研究「ハイブリッド構造に関する研究」(技術調整委員会委員長：青山博之日大教授)の一環として行われ、RCS分科会(主査：野口 博千葉大教授)では、貴重な御助言を頂きました。また、解析プログラムの開発にあたり、内田和弘氏(フジタ技術研究所)には、有益なる御助言、ならびに御協力を頂き、長沼一洋博士(大林組技術研究所)には、懇切丁寧な御指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】[1]雨宮 篤、内田 和弘、野口 博：“鉄筋コンクリート系部材の3次元有限要素解析(その1~2)”、日本建築学会大会講演梗概集(北陸)、pp1061~1064、1992.8 [2]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開発”、コンクリート工学年次論文報告集、pp21~26、VOL.14、No.2、1992 [3]坂口 昇：“鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁で構成される柱梁接合部パネルのせん断耐力”、日本建築学会構造系論文報告集、No.428、pp69~78、1989.7 [4]毛井 崇博、内田 優子、他4名：“柱RC梁S接合部の力学性状(その1~2)”、日本建築学会大会講演梗概集(中国)、pp1183~1186、1990.10 [5]小澤 潤治、山本 俊彦、須田 充司：“MIX構造(はりS・柱RC)における柱はり接合部実験(その2)”、東急建設技術研究所報 No.19、pp79~86 [6]Darwin,D.,and Pcnold,D.A.,“Nonlinear Biaxial Law for Concrete,”Journal of the Engineering Mechanics Division,ASCE,Vol.103,No.EM2,Proc. Paper 12839, April, 1977, pp. 229-241. [7]Alaa, A. Elwi, and David, W. Murray(1979), “A 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship”, Journal of the Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No. EM4, Proc. pa 14746, August, pp. 623-641. [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. William(1974): Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor, Nucl. Eng. Des., vol. 28, pp. 42-75 [10] Kuffer, H. B., and Gerstle, K. H., “Behavior of Concrete under Biaxial Stresses”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 99, No. EM4, Proc. Paper 9917, August, 1973, pp. 853-866 [11] Saenz, L. P.: Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete, by P. desayi and S. Krishnan, America Institute Journal, Vol. 61, Sept., 1964, PP. 1229-1235 [12] Park, R. and Leslie, P. D.: Curvature Ductility of Circular Reinforced Concrete Columns Confined by ACI Spirals, 6th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Vol. 1, Technical Papers, Christchurch, New Zealand, August 1977, pp. 342-349 [13] 大久保 雅章、濱田 聡、野口 博：“地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に対する基礎実験”、JCIコロキウム論文集、RC構造せん断設計法に関する解析的研究、1989年10月、pp.17-2227 [14]米澤健次、吉川秀章、大矢俊樹、野口 博：“プレートコンクリート構造の十字型柱の解析的研究”コンクリート工学年次論文報告集、vol.15、No.2、1993、pp1001-1006 [15]山田 嘉昭、江澤 良孝：“接合要素とその有限要素解析における応用”、生産研究、31巻6号、pp.519~524、1979.6 [16]山田 嘉昭著：“マトリックス材料力学”、培風館 [17]日本コンクリート工学協会：“混合構造委員会報告書”、pp.115~130、1983年