

論文 三次元有限要素解析を用いた柱 RC・梁 S の混合構造接合部のせん断性能に関する研究

米澤健次*・野口 博*²

要旨：本研究では、柱RC・梁Sの混合構造接合部における解析手法の確立及び、応力伝達機構の解析的解明を目的として、既往の実験試験体12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、解析モデル及び解析手法の妥当性を検証し、解析結果により得られた接合部内コンクリートの主応力の流れ図、及びウェブの応力分布図等の考察により、接合部のせん断抵抗機構の分析を行った。接合部コンクリートのせん断抵抗機構及び支圧抵抗機構は、直交梁の有無により大きな差異が生じ、接合部内ウェブのせん断有効率は、ふさぎ板等の補強の有無により異なり、それらを定量的に考察した。

キーワード：混合柱梁接合部、三次元有限要素解析、せん断抵抗機構、せん断有効係数

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。

そこで、筆者等は文献[1]で混合構造接合部における非線形有限要素解析手法（以下FEM解析）について検討し、既往の実験試験体3体を対象とした三次元解析を行い、解析手法及び解析モデルの妥当性を検証した。本論文では、さらに種々の接合部補強形式（ふさぎ板、エンドプレート補強、無補強）とした解析対象試験体を追加し、三次元FEM解析を行い、各補強形式の違いが応力伝達機構に与える影響を検証した。

2. 解析対象試験体

表-1に試験体概要を示し、図-1に各接合部ディテールを示す。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12体を選んだ。12体ともにS梁がRC柱に貫通しており、

それらの接合部補強形式はふさぎ板、エンドプレート補強、無補強の3形式に分類される。また、B,C試験体を除く10体の試験体は、接合部内に直交梁を有している。ここで、ふさぎ板形式とは、図-1に示すように接合部コンクリートを薄い鋼板でぐるりと巻いた試験体で、エンドプレート補強形式とは梁部材端部に鋼板を取り付け、接合部内はせん断補強筋のみで補強した試験体を示す。

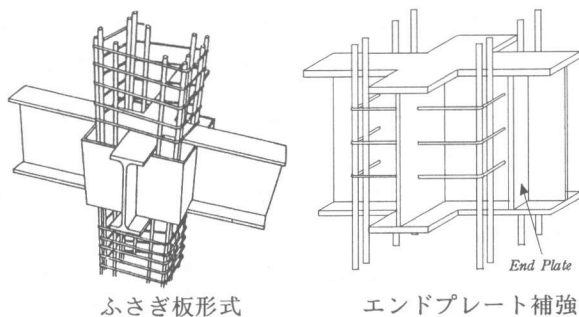


図-1 接合部ディテール

*1 (株)大林組技術研究所、前 千葉大学大学院生、自然科学研究科 博士(工学) (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

試験体名	研究機関	スパン (cm)	階高 (cm)	柱			梁			接合部		*1 補強形式	*2 破壊モード	*3 σ_B	文献
				断面(cm)	主筋	帯筋	断面(mm)	帯筋	ふさぎ板	EndPL					
S-1	清水建設	400	300	45×45	12-D19	4-U6.4@5	H-400*150*9*19		PL-3.2		F	P	334	[3]	
S-2	清水建設	400	300	45×45	12-D19	4-U6.4@5	H-400*150*9*19	D6@50			N	P	334	[3]	
No.2	竹中工務店	300	200	40×40	12-D19	4-8 ϕ @50	H-350*100*6*19	D6@130			N	P	303	[4]	
No.5	竹中工務店	300	200	40×40	12-D19	4-8 ϕ @50	H-350*175*6*12	D6@130		PL-9	E	P	307	[4]	
No.6	竹中工務店	300	200	40×40	12-D19	4-8 ϕ @50	H-350*175*6*12	D6@130			N	P	307	[4]	
C-0	東急建設	400	180	35×35	12-D19	2-D10@75	H-300*150*6.5*9			PL-12	E	P	278	[5]	
C-6	東急建設	400	180	35×35	12-D19	2-D10@75	H-300*150*6.5*9		PL-6	PL-12	F	P	278	[5]	
C-3.2c	東急建設	400	180	35×35	12-D19	2-D10@75	H-300*150*6.5*9		PL-3.2		F	B	340	[6]	
C-3.2c-C	東急建設	400	180	35×35	12-D19	2-D10@75	H-300*150*6.5*9		PL-3.2		F	C	340	[6]	
B	建研	300	180	30×30	4-D13	D6 @50	H-180*120*6*6	2-D6@90		PL-12	E	P-C	307	[7]	
C	建研	300	180	30×30	4-D13	D6 @50	H-180*80*6*9	2-D6@90		PL-12	E	P-C	307	[7]	
G	建研	300	180	30×30	4-D13	D6 @50	H-180*80*6*9	2-D6@90		PL-12	E	P-C	307	[7]	

*1補強形式・・・F：ふさぎ板、N：無補強、E：エンドプレート補強

*3（単位：kgf/cm²）

*2破壊モード・・・B：梁曲げ、C：柱曲げ、P：接合部せん断

また、無補強とは、接合部内はせん断補強筋のみで補強され、その他に特別な補強がなされていない基本的な試験体を示す。実験時の加力は12体ともに、柱頭部に一定軸力を加え、梁部材端または柱頭部に正負繰り返し載荷が行われている。

3. 解析手法及び解析モデル

本解析では、混合構造接合部の挙動を精度良く追跡するために開発した、低次要素及び接合要素を有する三次元FEM解析プログラム[1][2]を用いた。

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。

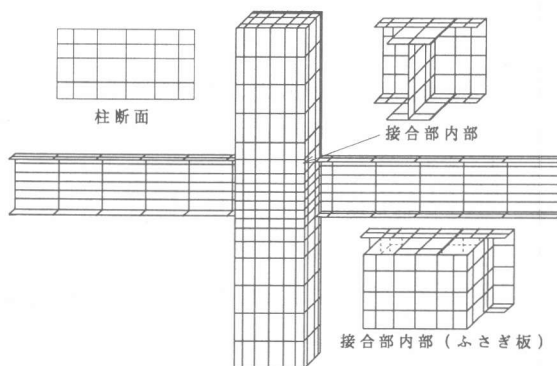


図-2 要素分割

解析は、柱頭部に一定軸力を加えた後に、梁端部に荷重増分を与えた。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方性体とし、Darwin・Pec-knold等の等価一軸ひずみモデルを、Murray等が三次元に拡張したものを使用した。破壊曲面には、Willam-Warnekeの3パラメータモデルにさらに二つの自由度を加えた5パラメータモデルを用いた。なお、破壊曲面を決定する5つのパラメータのうち、一軸圧縮強度と一軸引張強度は材料試験結果を用い、その他3つのパラメータは試験体のコンクリート強度に類似したKupferの平板実験の結果（等二軸圧縮、応力比の違う二軸圧縮）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Murray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、野口等の提案式を用いて、圧縮強度低減係数 λ を決定し、圧縮応力を受ける方向に対して前述の破壊条件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。なお、一つ

の積分点に2つのひび割れが生じた場合（引張－引張－圧縮）は、2つのひび割れと直交方向の引張ひずみのうち、大きい方の引張ひずみを用いて λ を算定した。（上記のモデルは、文献[1]、[2]に基づく）

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。

ボンドリンク要素：鉄筋とコンクリートの付着－すべり関係を表現するために、互いに直交するバネからなるリンク要素を用いた。表-2にボンドリンクの材料定数を示す。無補強及びエンドプレート補強の解析では、張等[8]のRC柱の解析に用いられた材料定数(CASE1)を用い、ふさぎ板形式の解析では、ふさぎ板による接合部コンクリートの拘束効果により付着性状が向上することを考慮して、第二剛性と各付着強度を比較的大きく設定した材料定数(CASE2)を用いた。

接合要素：筆者等は通常の8節点ソリッド要素の形状関数を用いて、三次元解析に適應できる接合要素[1]

を開発し、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した。鋼板とコンクリートのすべての界面は、節点を別々に定義し、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。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 ($\sigma_n - S_n$) :

σ_n が引張力を受ける場合には、約0.04Fc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_n 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すべり挙動 ($\sigma_t - S_t$) :

σ_t が0.04Fcに達するまで一定の剛性を与え、線形を仮定した。その後は、 σ_n が圧縮応力を受ける場合、(1)式で得られた剛性を用い、摩擦係数を0.65とし、 $\sigma_t > 0.65 \cdot \sigma_n$ に達したら、 $\sigma_t = 0.65 \cdot \sigma_n$ として余剰応力を解放した。 σ_n が引張応力を受ける場合には、 σ_t を零とし、余剰応力を解放した。

$$K_t = - \frac{\mu_c \sigma_n}{0.002} \cdot h \quad (\sigma_n < 0) \quad \text{-----(1)}$$

μ_c : 摩擦係数(=0.65)、 h : 接合要素の厚さ、 σ_n : 境界面に法線方向の応力

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の結果[9]を用いて決定した。ここで、粘着強度は0.04Fcとした。(1)式は、鋼板とコンクリート間の付着特性に関する基礎実験[10]の考察により得られた付着応力－すべり関係における剛性の算定式である。（ $\sigma_t, S_t, \sigma_n, S_n$ は図-3参照、Fc:コンクリート強度）

表-2 ボンドリンク材料定数

	E_A	E_{AB}	τ_A	τ_{max}
CASE1	8000	80	10.3	26.3
CASE2	8000	850	25.0	40.0

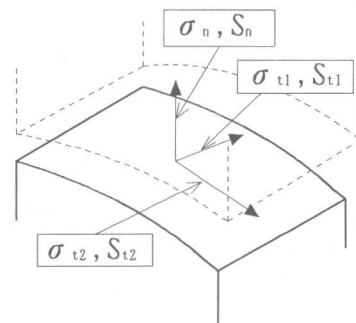
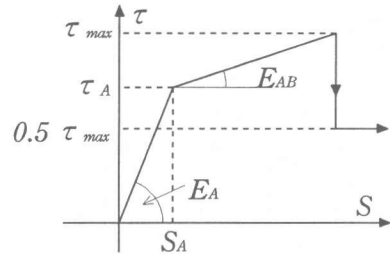


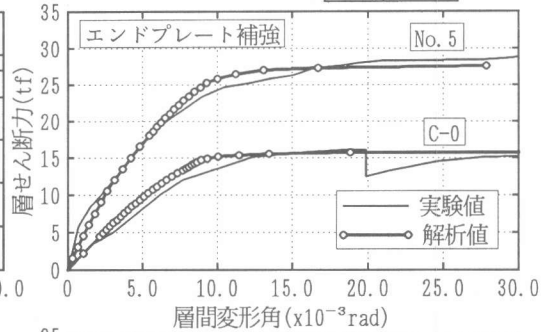
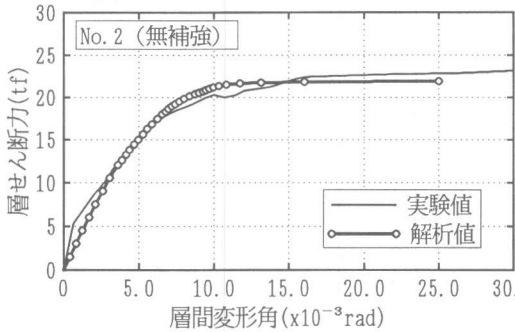
図-3 接合要素

表-3 解析結果一覧

試験体名	研究機関	補強形式	直交梁	降伏開始時の荷重(tf)				破壊モード*1		最大耐力(tf)		
				梁 フランジ	接合部 フープ	接合部 ウェブ	接合部 補強鋼板	実験値	解析値	実験値	解析値	耐力比較 *2
S-1	清水建設	ふさぎ板	有	28.5	—	25.1	28.4	P	P	31.0	29.1	1.07
S-2	清水建設	無補強	有	—	22.7	20.8	—	P	P	23.0	22.3	1.03
No.2	竹中工務店	無補強	有	20.8	—	21.6	—	P	P	22.3	21.9	1.02
No.5	竹中工務店	Endplate	有	27	27.6	26.4	—	P	P	30.9	28.0	1.10
No.6	竹中工務店	無補強	有	—	24.7	24.3	—	P	P	23.3	24.7	0.94
C-0	東急建設	Endplate	有	15.6	14.9	14.4	—	P	P	16.2	15.9	1.02
C-6	東急建設	ふさぎ板	有	16.9	—	17.3	—	P	P	23.8	21.8	1.09
C-3.2c	東急建設	ふさぎ板	有	16.4	—	16	19.1	B	P	22.8	22.2	1.03
C-3.2c-C	東急建設	ふさぎ板	有	22.7	—	17.8	20.4	C	P	24.9	24.0	1.04
B	建研	Endplate	無	4.6	—	5.6	—	P-C	P-C	6.5	7.0	0.94
C	建研	Endplate	無	6.2	—	6	—	P-C	P-B	6.2	6.4	0.96
G	建研	Endplate	有	6.3	7	6	—	P-C	P-C	7.0	7.0	1.00
										平均	1.02	

*1 破壊モード・・・B：梁曲げ、C：柱曲げ、P：接合部せん断

*2 実験耐力/計算耐力



4. 解析結果

図-4に解析結果から得られた層せん断力-層間変形角関係の一例を示し、表-3に解析結果一覧を示す。図-4からわかるように、ふさぎ板形式について、解析値は実験値に比べ、剛性をやや大きめに評価しているが、耐力に関しては良好に対応している。また、無補強、エンドプレート補強形式の解析値は、剛性及び耐力ともに実験値と良好に対応しており、良好に実験結果を追跡しているのがわかる。全12体の解析から得られた耐力は、表-3からわかるように、実験値に対して10%以内の誤差に収まっており、耐力及び破壊モードに関しては補強形式の異なりに関わらず、精度良く対応している。しかし、ふさぎ板形式について、剛性を大きめに評価する傾向があることに関しては、さらに検討が必要である。

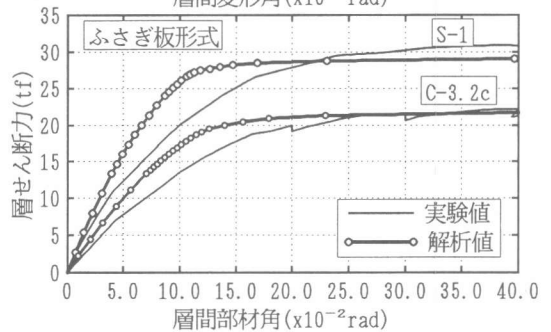


図-4 層せん断力-層間変形角関係

5. せん断抵抗機構の検証

5.1 接合部コンクリートのせん断抵抗

図-5に直交梁を有するNo.5と直交梁を持たないB試験体の解析から得られた各幅位置における接合部コンクリートの圧縮主応力の流れを示す。なお、両試験体ともにエンドプレート補強形式の試験体であり、両試験体の破壊モードはNo.5は接合部せん断破壊、Bは接合部降伏後柱曲げ降伏で耐力に至っている。図-5から分かるように、直交梁を有するNo.5では、接合部内梁フランジ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ており、

結ぶ方向に主応力が流れ、その方向に圧縮ストラットが形成されている。

一方、直交梁を持たないB試験体では、接合部パネルの対角線を結ぶ方向に圧縮主応力が流れ、その方向に圧縮ストラットが形成されている。また、接合部の中央部から離れるほど、主応力の大きさが小さくなる傾向が、No.5に比べ、顕著に観察される。このことから直交梁が、接合部コンクリートの有効幅を広げる効果が推察される。しかし、直交梁を有する試験体では、直交梁を持たない試験体に比べ、圧縮ストラットの角度が急になり、直交梁が必ずしもせん断抵抗に対して有効であるとは言えない。梁からの入力、直交梁ウェブの支圧により接合部外側に伝達され、直交梁はむしろ接合部内のフランジ付近の応力集中を防ぐ効果があり、支圧抵抗に対して有効であることが考えられる。

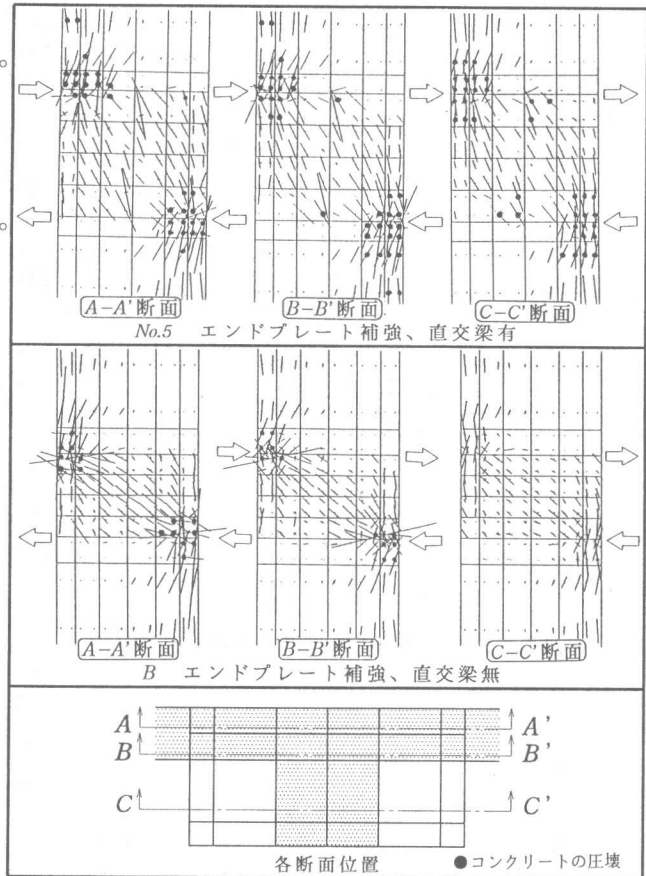


図-5 接合部コンクリートの主応力の流れ

5. 2 接合部内ウェブのせん断抵抗

ふさぎ板の有無をパラメータとしたS-1, S-2、及びエンドプレートの有無をパラメータとしたNo.5, No6について、解析から得られた接合部内ウェブのせん断応力分布を図-6、図-7に示す。これらは、梁芯に平行な中央ライン上のせん断応力分布である。図-6、図-7からわかるように、補強形式に関わらず、中央部（柱芯）で最大の曲線分布となり、せん断降伏は中央部から始まっている。

無補強のS-2とNo.6試験体のせん断応力分布の傾向は、ふさぎ板及びエンドプレート補強の試験体と比べ、荷重の増加に伴う接合部中央部と端部のせん断応力値の差は大きく、接合部ウェブ端部のせん断応力がかなり遅れて上昇し、終局時に至っても端部のせん断応力は小さい値を示している。このことから、ふさぎ板及びエンドプレートは、接合部からのフランジの抜け出し、及びめり込みを防止し、接合部ウェブのせん断に対する有効断面積を広げる効果が有ることがわかる。

以上に示したように、接合部内ウェブのせん断に対する有効率は、補強の有無により異なり、それぞれの補強形式における接合部ウェブのせん断有効率を明確にするために、解析結果を用いて接合部ウェブせん断有効係数(k_w)を計算した。表-4にそれらの計算結果を示す。ここで、接合部ウェブのせん断負担力(Q_w)は、既往の研究[3]を参考にして接合部ウェブのせん断変形が0.4%時の接合部ウェブ積分点における内部応力により計算した。また、 k_w は次式により計算した。

$$k_w = \frac{Q_w}{w \sigma_y / \sqrt{3} \cdot D_c \cdot t_w} \quad \text{-----}(2)$$

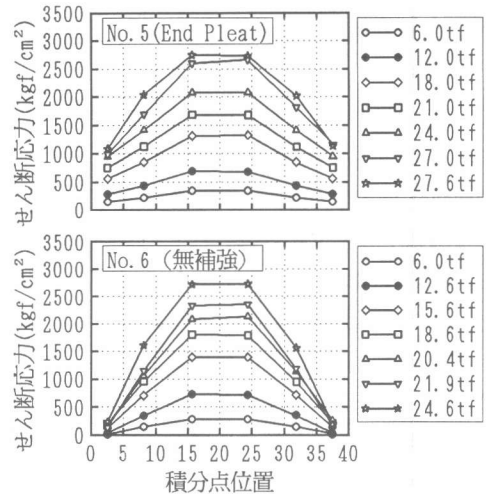
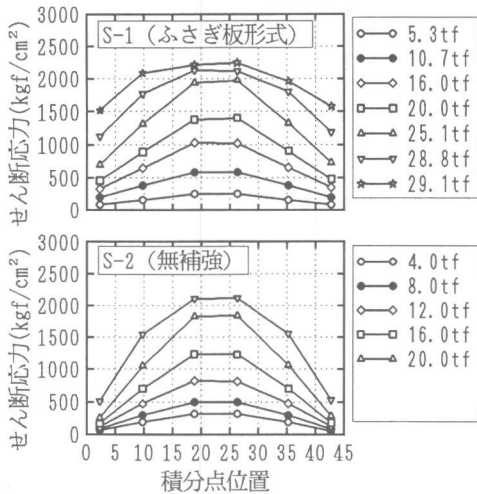


図-6 せん断応力分布（ふさぎ板の有無）

図-7 せん断応力分布（エンドプレートの有無）

各補強形式によるkwの平均値は、ふさぎ板形式の試験体で0.86、エンドプレート補強の試験体で0.85、無補強の試験体で0.69あった。各補強形式のkwは若干のばらつきがあるが、無補強の試験体に比べ、ふさぎ板及びエンドプレートにより補強された試験体のkwは高めの値を示し、補強の効果が顕著にわかる。また、直交梁の有無をパラメータとしたC,G試験体に関して、kwはほぼ同程度の値を示し、接合部内ウェブの有効係数に対して、直交梁の有無による影響は見られなかった。

表-4 接合部内ウェブの有効係数

		Dc	tw	wσy	wQ	kw
ふさぎ板	S-1	45	0.87	3620	66.8	0.82
	C-6	35	0.65	3260	36.9	0.86
	C-3.2c	35	0.65	2867	34.3	0.91
	C-3.2c-CP	35	0.65	2867	32.5	0.86
エンドプレート	No.5	40	0.60	4720	48.8	0.75
	C-0	35	0.65	3260	36.7	0.86
	G	30	0.60	3180	29.4	0.89
	C	30	0.60	3180	30.5	0.92
無補強	S-2	45	0.87	3620	59.6	0.73
	No.6	40	0.60	4720	42.2	0.64

Dc: 柱せい, tw: ウェブ厚, wσy: 鋼材の降伏点

6. まとめ

本研究では柱RC・梁Sの混合構造接合部に関して、無補強、エンドプレート補強、ふさぎ板の3形式の12体の試験体を解析対象として、三次元有限要素解析を行い、解析結果を用いて接合部のせん断抵抗機構の検証を行った。本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- 1) 解析対象試験体12体の解析結果は、ふさぎ板形式の試験体に関しては剛性をやや過大評価する傾向を示したが、耐力に関しては10%以内の誤差に収まり、実験結果と良好に対応した。
- 2) 接合部内コンクリートのせん断抵抗機構は、直交梁の有無により異なり、直交梁が有る場合は、直交梁に分断された2対の圧縮ストラットが形成される。
- 3) 接合部ウェブせん断有効係数は、補強の有無により異なり、ふさぎ板形式及びエンドプレート補強形式で0.85程度、無補強の試験体で0.7程度であった。

【謝辞】本研究はハイブリッド構造に関する日米共同研究（技術調整委員会委員長：青山博之の日本大学教授）の一環として行われた。

【参考文献】[1]米澤健次、野口 博：“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”、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻、第2号、pp.1247~1252、1994年 [2]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、第14巻、第2号、pp.21~26、1992年 [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、第428号、pp.69-78、1991年10月 [4]本間優子、杉山培、東端泰夫、藤村勝、持田哲雄、毛井崇博：“柱RC・梁S接合部の力学的性状(その1)、(その2)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1183-1186、1990年10月 [5]小澤潤治、山本俊彦、岩倉知行、須田充司：“MIX構造(はりS・柱RC)における柱はり接合部実験”、東急建設技術研究所報 No.18、p.73-78、1992年10月 [6]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、pp.79-86、1993年10月 [7]西山功、長谷川藤、山内泰之：“柱が鉄筋コンクリート造、はり鉄骨造である柱-はり接合部の耐力と変形”、建築研究資料 No.71、建設省建築研究所、1990年9月 [8]張 愛輝：“鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析”、千葉大学学位論文、1991年 [9]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 [10]金沈洸、米澤健次、野口 博：“鋼とコンクリートからなる合成構造の付着特性に関する研究”、建築学会大会梗概集（東海）、pp.1631-1632、1994.9