

# 論文 柱 RC・梁 S 混合構造接合部のせん断耐力に関する解析的研究

金 洸演\*<sup>1</sup>・野口 博\*<sup>2</sup>

**要旨：** 本研究では、建物における混合構造接合部の形状の違いが接合部のせん断耐力に与える影響を調べるため、ト字形及び L 字形接合部の実験試験体を対象に 3 次元有限要素解析を行い、接合部コンクリートとウェブの有効幅の取り方などを検討した。解析結果の検討から、ウェブの有効幅はト字形で 0.8 程度、L 字形で 0.6 程度であり、コンクリート項の形状係数の値はト字形で 0.24 に対して L 字形で 0.14 程度であることがわかった。また、接合部コンクリートは内部と外部パネルで分けて考え、補強ディテールの影響を外部パネルの有効幅の扱いとして考慮したせん断耐力式の提案を試みた。

キーワード：混合構造接合部、接合部形状、有効幅、せん断耐力、FEM 解析

## 1. はじめに

最近、柱 RC・梁 S で構成される混合構造(RCS)に関する研究が各研究機関で活発に行われている[1]。しかし、その研究対象のほとんどが十字形の内柱・梁接合部に集中しているのが現状である。RCS 接合部のせん断耐力は、接合部形状の違い(十字形、ト字形、T字形、L字形)や接合部の補強ディテールに影響されるため、形状や補強ディテールの違いによるせん断耐力への影響を調べる必要がある。そこで本研究では、筆者らが行った実験試験体[2]と建築研究所(建研)の試験体[3]を対象に 3 次元有限要素解析を行い、接合部コンクリートおよびウェブの有効幅の取り方などを検討し、接合部耐力式の提案を試みた。

## 2. 実験概要

試験体の一覧及び使用した材料の機械的特性を表-1に示す。試験体は合計 8 体で、梁貫通型

表-1 試験体の一覧及び諸元

試験体名	EXH-3	EXH-4	EXH-5	EXBR-4	EXBR-6	CO-3	COBR-4	COBR-6
補強ディテール	Ext.FBP	ハットプレート	ふさぎ板	複合タイ	鉛直スリ	FBP	複合タイ	鉛直スリ
試験体の形状	ト字形					L字形		
接合部の形式	梁貫通型			柱貫通型		梁貫通型		柱貫通型
破壊モード	接合部降伏型(想定)					柱降伏型(主筋の定着破壊)		
RC柱	軸力	0.1 $\sigma_B \cdot b \cdot D$ (一定)		0.1 $\sigma_B \cdot b \cdot D$ (変動)		-----		
	断面	300x300(mm)						
	主筋	12-D16 $p_g=2.65\%$ (SD685)						
	帯筋	4-D6 @60 $p_w=0.7\%$ (SD785)						
S梁	断面	6x28	BH-250x100x6x32	BH-250x100x9x32		6x28	BH-250x100x9x32	
接合部(帯筋)	2-D6 @50 $p_w=0.34\%$			$\phi$ 6.0 (3段)		2-D6 @50	$\phi$ 6.0 (3段)	
FBP	PL16(SS400)			PL9(SM490)		PL16	PL9(SM490)	
ハットプレート	-----	PL9	-----	PL3.2	-----	-----	PL3.2	-----
ふさぎ板	-----	-----	PL3.2	PL3.2	-----	-----	PL3.2	-----
鉛直スリ	-----			PL12(SS400)		-----	PL12(SS400)	
ウェブ	PL6(SM490)			PL6(SM490)		PL6	PL6(SM490)	
比較対象	EX-3	EX-4	EX-5	BRI-NO.4	BRI-NO.6	EX-3	BRI-NO.4	BRI-NO.6

\* 1 西松建設技術研究所(前、千葉大学大学院 自然科学研究科)、工博(正会員)

\* 2 千葉大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

では、延長FBP形式のEXH-3、バンドプレート形式のEXH-4、ふさぎ板形式のEXH-5の3体がト字形、FBPのみのCO-3がL字形である。柱貫通型では、ふさぎ板と鉛直スチフナがある複合タイプのEXBR-4、鉛直スチフナだけのEXBR-6の2体がト字形、同型式のCOBR-4、COBR-6の2体がL字形である。

これらの試験体では、柱の支圧破壊や曲げ破壊を避けるため、柱に高強度コンクリート ( $F_c=800\text{kgf/cm}^2$ ) を用い、接合部のみに普通強度コンクリート ( $F_c=270\text{kgf/cm}^2$ ) を用いた。図-1に試験体の形状を示す。

一方、建研の試験体はいずれも十字形で、鉛直スチフナの厚さをパラメータとした3体を対象にした[3]。

### 3. 解析手法及び解析モデル

本解析では、米澤・内田・雨宮らが開発した接合要素を有する3次元FEM解析プログラム[4]を用いた。図-2にト字形試験体の要素分割を示す。解析は、単調載荷とし、以下に解析モデルの概要を示す。

**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-Pecknoldらの等価一軸ひずみモデルをMurrayらが3次元に拡張したもの[6]を使用した。破壊曲面には、Willam-Warnke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[7]を用いた。ひびわれは分布ひびわれモデルとし、ひびわれ平行方向のせん断剛性は無視した。ひびわれたコンクリートの圧縮劣化特性には、ひびわれと直交方向の引張ひずみの関数とした野口らの提案式[5]を用いた。

**プレート要素:** 4節点の平面シェル要素で、Von Misesの降伏条件式に基づく完全弾塑性モデル。

**鉄筋要素:** 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:** 互いに直交するバネからなるリンク要素を用いた。

**接合要素:** 8節点ソリッド要素の形状関数を用いて米澤らが開発したの[4]を用いた。梁フランジ及びウェブとコンクリート間のすべての界面は、接合要素を設けすべりを表現したが、エンドプレートなどの補強ディテールは拘束が大きく、そのすべりが比較的少ないと考えられるから、計算量節減のために、すべて接合部コンクリートと完全付着と仮定した。

## 4. 解析結果の検討

### 4.1 柱せん断力-層間変形関係の比較

図-3に、解析結果からの柱せん断力-層間変形関係を示す。本研究では、柱の高強度コンク

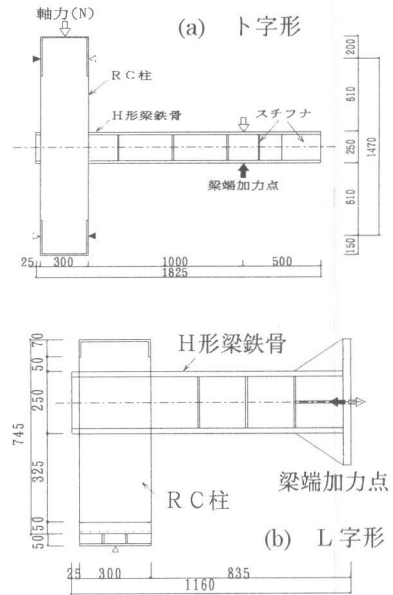


図-1 試験体の形状

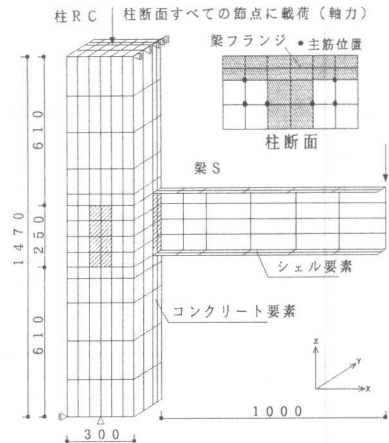


図-2 要素分割

リートが接合部コンクリートの拘束に与える影響を調べるため、接合部上下柱コンクリート（梁せいの 1/5 程度）部分に普通コンクリートを用いた仮想試験体についても解析結果を行った（凡例の中で試験体の名前最後に N が付いているのが普通コンクリートを用いたものである）。

梁貫通型では解析結果の最大耐力が実験値に比べて若干低いものの、初期剛性及び変形などについては実験結果と良好に対応している。また、接合部上下柱コンクリート部分に普通コンクリートを用いた解析では、最大耐力が実験値に比べ約 1.2 割程度の低下が見られ、実験で高強度コンクリートを用いた柱が接合部コンクリートの拘束に与える影響を近似的に評価できた。

柱貫通型では初期剛性は実験と良好な対応を見せているが、最大耐力に関しては、両試験体とも実験値に比べて、約 1 割程度低い結果となった。これは、解析では、柱せん断力 8tonf と 10tonf 程度時から接合部内ウェブ及び鉛直スチフナが降伏し始め、14.5tonf 程度時では梁を含むすべての鉄骨が降伏したのに原因があると考えられる。一方、建研での実験試験体については良好に対応している。

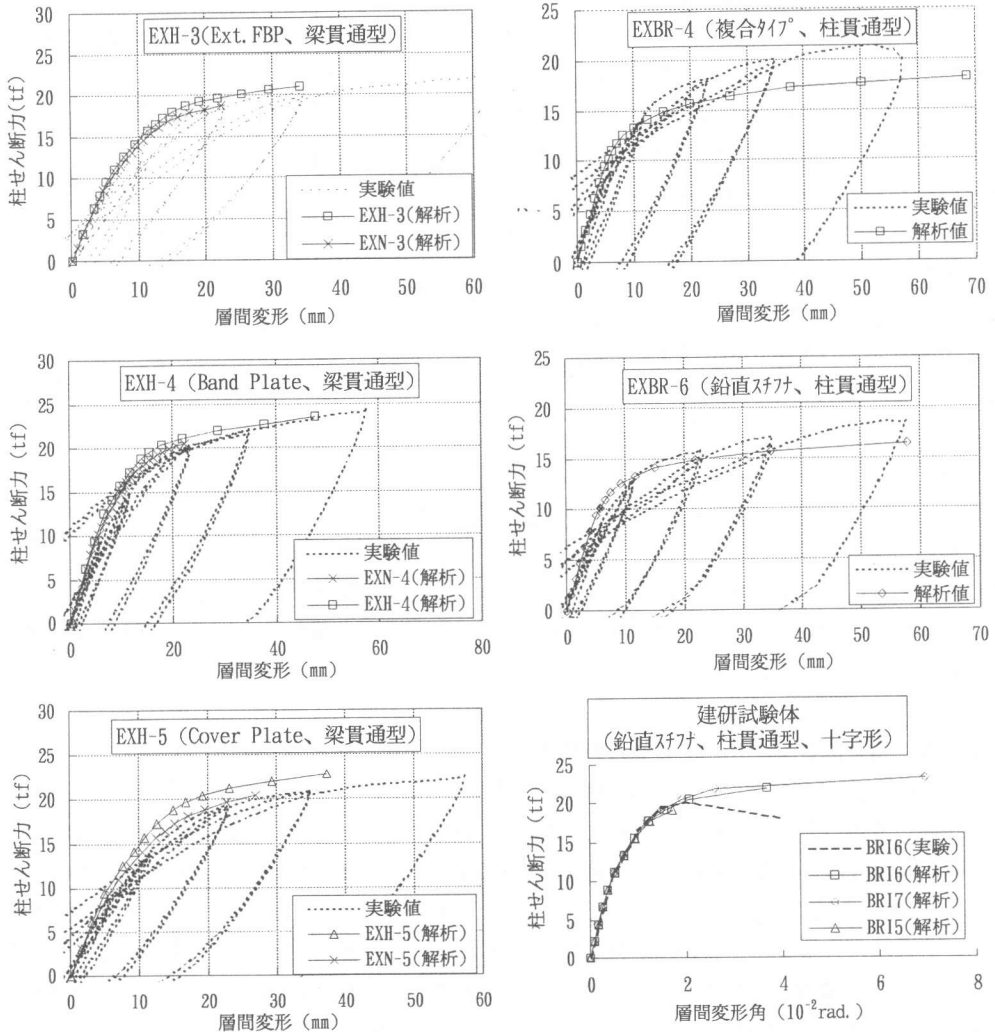


図 - 3 柱せん断力 - 層間変形関係

図-4にL字形であるCO-3試験体の柱せん断力-層間変形関係を示す。初期剛性の実験値は、解析値より低くなっているが、これは実験での最初の加力が実験装置の問題で不調だったため、層間変形角  $R=1/100$  までの繰り返し载荷による復元力特性の劣化のためと考えられ、層間変形角  $R=1/100$  以後での剛性及び最大耐力は実験と良好に対応している。また、接合部上下柱コンクリート部分に普通コンクリートを用いた解析では、ト字形と同様に、最大耐力が実験値に比べ約2割程度の低下が見られた。

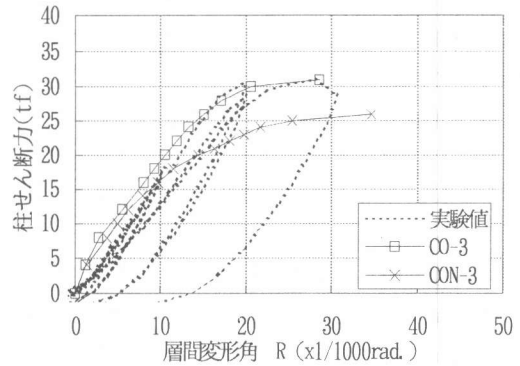
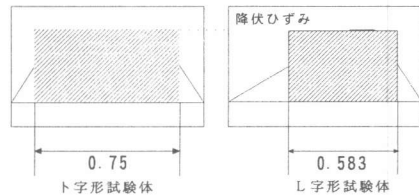


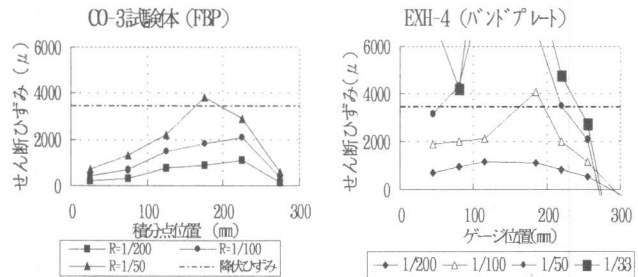
図-4 L字形の柱せん断力-層間変形関係

#### 4.2 ウェブの有効幅の割合

図-5にL字形FBP形式のCO-3試験体とト字形のEXH-4試験体の解析結果から得られた接合部内ウェブのせん断ひずみ分布を示す。L字形のCO-3試験体では、層間変形角  $R=1/50$  の最大耐力時にせん断ひずみが降伏ひずみに達しているのは端部から3番目の積分点だけなので、ひずみ分布を、両端部を0とし3番目の積分点を頂点とする3角形分布で仮定すると、ウェブの有効幅の割合は0.583となる。一方、ト字形の試験体では台形のひずみ分布となり、ウェブの有効幅の割合は0.75となる。そこで、ひずみ硬化及び粹効果などを考慮するとウェブの有効幅は、ト字形で坂口らの研究と同様に0.81程度、L字形で0.6程度であると考えられる。



(a) 有効幅の仮定



(b) 実験及び解析でのひずみ分布

図-5 ウェブのせん断ひずみ分布と有効幅の仮定

#### 4.3 接合部コンクリートのせん断応力

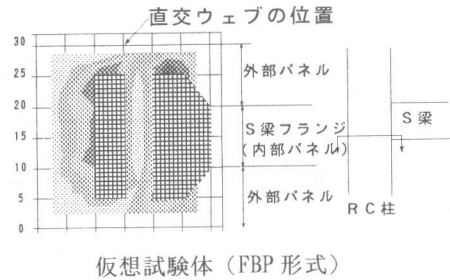
図-6に延長FBP形式のEXH-3試験体を対象に、延長FBPの影響を調べるため延長FBPを取り除いた仮想試験体の解析結果から得られた最大耐力時のコンクリートのせん断応力のコンターを示す。接合部内の広い範囲でせん断応力が  $0.24 \sigma_B$  ( $75 \text{kgf/cm}^2$ ) を越えており(網掛けした部分)、直交梁を挟んで加力方向のコンクリートの負担分が大きい。また、外部パネルの外側半分は殆どせん断に寄与していないのが分かる。一方、延長FBP形式のEXH-3試験体及びぶさぎ板形式のEXH-5試験体では、FBP形式を対象にしたものと比べると、せん断応力が  $50-100 \text{kgf/cm}^2$  を超えている部分が外部パネルの方に広がっているのがわかる。このことから、コンクリートのせん断抵抗が内部パネルと外部パネルでは違う挙動を示すことに着目し、内部パネルは全断面が

有効で、外部パネルについては各補強ディテールの拘束効果によって有効幅が算定されると仮定し、せん断耐力式の提案を試みた。

#### 4.4 接合部せん断耐力

提案する耐力式の概要を下記に示す。

$$\begin{aligned}
 Q_{pu} &= Q_w + Q_h + Q_{ci} + Q_{co} \\
 Q_w &= k_w \cdot s_w \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \cdot t_w \cdot D_c \\
 Q_h &= 1/4 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot D_c \cdot j_b \\
 Q_{ci} &= k_j \cdot \sigma_B \cdot B_b \cdot D_c \\
 Q_{co} &= k_j \cdot \sigma_B \cdot k_{co} \cdot (B_c - B_b) \cdot D_c
 \end{aligned}$$



ここで、

- $Q_{pu}$ : 接合部のせん断終局耐力
- $Q_w$ : 鉄骨ウェブの負担分
- $Q_h$ : フープ筋の負担分
- $Q_{ci}, Q_{co}$ : 内部及び外部コンクリートの負担分
- $k_w$ : ウェブの有効断面の割合を示す係数  
(十字形=0.83、ト字形=0.81、L字形=0.6)
- $k_j$ : 接合部形状による接合部コンクリート強度の係数 (十字形=0.3、ト字形=0.24(梁貫通型では1.2倍)、L字形=0.14)
- $k_{co}$ : 補強ディテールによる外部コンクリートの有効断面の割合を示す係数
- $s_w \sigma_y$ : 鉄骨ウェブの降伏応力度
- $t_w$ : 鉄骨ウェブの厚さ
- $p_w$ : 接合部のせん断補強筋比
- $\sigma_{wy}$ : せん断補強筋の降伏応力度
- $j_b$ : 梁フランジ中心間距離
- $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮応力度
- $D_c$ : 柱せい、  $B_b$ : 梁幅、  $B_c$ : 柱幅

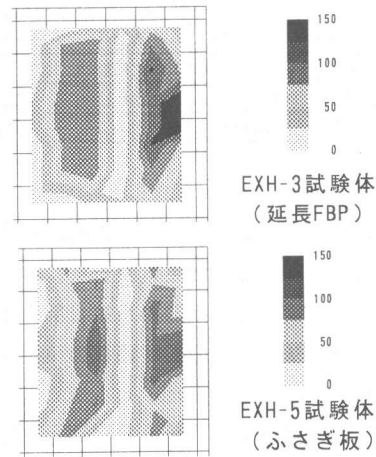


図-6 コンクリートのせん断応力のコンター

表-2 外部パネルの有効幅の係数 ( $k_{co}$ )

補強ディテール (試験体)	$k_{co}$
延長FBP (EXH-3)	0.45
ハットプレート (EXH-4)	0.45
ふさぎ板 (EXH-5)	0.55
鉛直スチフナ (EXBR-6)	0.60
鉛直スチフナ+ふさぎ板 (EXBR-4)	0.80

コンクリートの有効幅の扱いとしては、内部パネルは全断面が有効で、外部パネルは補強ディテールによって表-2に示すように有効幅の係数を与えることで評価する方法を試みた。この有効幅の係数は、実験結果の最大耐力からウェブの負担分とフープ筋の負担分を除いたものをコンクリートの負担分と仮定し、その逆算から計算したものである。接合部形状による接合部コンクリート強度の係数  $k_j$  は、同じディテール (FBP形式) で接合部の形状をパラメータとした三つの試験体の実験結果からコンクリートの有効幅が一定 (梁幅+0.1×外部パネルの幅) になるので、同じく実験結果から求めたコンクリートの負担分から計算したものである。

表-3と4に解析結果から得られた最大耐力を実験結果及び計算結果と比較して示す。解析値は、柱貫通型の EXBR-4,6 試験体で実験結果に比べて若干低めであるが、全体では実験結果と比べて約10%以内の誤差に収まっている。一方、提案式による計算値は、梁貫通型について若干低

く評価している。これは、柱に高強度コンクリートを用いた影響と考えられ、接合部上下に普通コンクリートを用いた仮想試験体については良い対応を示している。また、建研試験体に関しては鉛直スチフナの厚さが最も厚い BRI7 試験体について安全側で評価している。

表-3 千葉大試験体の最大耐力の比較 (\*単位: 柱せん断力 tonf)

試験体	実験値*	解析値*	解析普通*	計算値*	解析/実験	実験/計算	解析普通/計
EXH-3	21.9	21.1	18.8	18.7	0.96	1.17	1.01
EXH-4	24.1	23.5	20.5	19.6	0.98	1.23	1.05
EXH-5	22.2	22.7	20.3	20.3	1.02	1.09	1.00
EXBR-4	21.4	19.5	18.1	19.3	0.91	1.11	0.94
EXBR-6	18.6	17.2	16.4	17.6	0.92	1.06	0.93
CO-3	31.0	31.5	26.0	26.1	1.03	1.19	1.00

表-4 建研試験体の最大耐力の比較 (\*単位: 柱せん断力 tonf)

試験体(スチフナの厚)	実験値*	解析値*	計算値*	解析/実験	実験/計算	解析/計算
BRI5 (4.5mm)	19.1	19.1	21.1	1.00	0.91	0.91
BRI6 (6mm)	20.1	20.4	21.1	1.01	0.95	0.97
BRI7 (12mm)	21.6	21.7	21.1	1.01	1.02	1.03

## 5. まとめ

柱RC・梁Sで構成される混合構造接合部における接合部形状の影響を調べるため、既往の試験体を対象に3次元有限要素解析を行った。

解析及び実験結果の検討から接合部内ウェブの有効幅はト字形で0.8程度、L字形で0.6程度であり、コンクリート項の形状係数の値は十字形で0.30に対して、ト字形で0.24、L字形で0.14程度であることがわかった。

また、接合部コンクリートは内部と外部パネルで分けて考え、補強ディテールによる耐力上昇分を外部パネルの有効幅の扱いとして考慮したせん断耐力式の提案を試み、実験及び解析値との比較を行った結果、比較的良い対応を示した。

[謝辞] 本研究はハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(技術調整委員会委員長: 青山博之東大名誉教授)の一環として実施されたもので、RC S分科会(主査: 野口 博千葉大教授)では貴重なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 【参考文献】

- [1]日本建築学会: 柱RC梁Sとする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム、1994.12
- [2]松原正、紅谷信行、遠藤浩、金洸演、野口博: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(RCS-19~22)、日本建築学会大会梗概集、C-1構造Ⅲ、pp.1117-1124、1996.9
- [3]倉本洋、鴨川直昌、鴨下直樹、勅使川原正臣、西山功: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(RCS-1~3)、日本建築学会大会梗概集、C1、pp.881-886、1995.8
- [4]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、Vol.16、No.2、pp.1247-1252、1994.6
- [5]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、pp.17-27、1989.10
- [6]Alaa, A. Elwi and David, W. Murray, "A 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No. EM4, Proc. Paper 14746, pp. 623-641, August, 1979.
- [7]Argyris, J. H. G. Faust, J. Szimmit, E. P. Warnke, and K. J. Willam, "Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor", Nucl. Eng. Dec., Vol. 28, pp. 42-75, 1974.