

論文 混合構造柱 RC・梁 S 接合部の三次元有限要素解析

鈴木晶子^{*1}・成川将人^{*2}・柏崎隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨：柱 RC・梁 S で構成される混合構造では、接合部の挙動を把握することが重要となる。本研究では、混合構造柱梁接合部の応力伝達機構の検討を行い、接合部のせん断抵抗機構確立のための基礎資料を得ることを目的とした。梁フランジを模擬した梁貫通型柱の解析から、内部パネルから外部パネルへの立体トラスモデルを立体的に捉えることができた。また、スラブ付き立体柱梁接合部 2 方向加力実験の解析結果からは、加力方向の違いによる接合部の応力状態を把握することができた。

キーワード：混合構造、柱 RC・梁 S、三次元有限要素解析、応力伝達機構、立体柱梁接合部

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行われ、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、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、混合構造接合部の応力伝達機構に関しては概念的なものが多く、特に内部パネルから外部パネルへの応力伝達機構の考察に基づいた評価は十分にされていないのが現状である。また、立体柱梁接合部に関して、これまでに多くの実験が実施されているが²⁾、解析的知見により加力方向の影響を研

究したものはあまり例がなく、応力機構に基づく耐力算定法の定式化にはまだ至っていない。そこで本研究では、RCS 接合部の基礎実験と立体柱梁接合部の 2 方向地震応答実験のそれぞれについて三次元有限要素解析を行った。基礎実験により得られたトラスモデルの分力の検証と応力伝達の検討、及び立体架構実験により得られた加力方向の影響を検討することにより、接合部のせん断抵抗機構確立のための基礎データを得ることを目的とする。

2. 梁貫通型試験体

2.1 応力伝達機構

RCS 混合構造の柱梁接合部に関する S 梁から RC 柱への応力伝達機構について、西村等の研究³⁾において以下のように説明されている。図-1は、内部パネルから外部パネルへの応力伝達機構を、鉄骨ウェブパネルから半分を取り出して示したものである。梁部材からの入力、まず内部パネルに伝達され、S フランジ上下面に取り付けられたシアキー (スタッド、H 形鋼など) によって生ずる

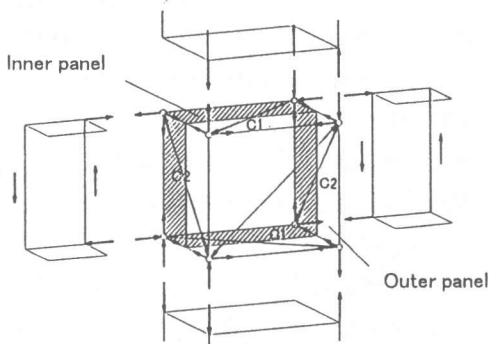


図-1 応力伝達機構

*1 千葉大学大学院 自然科学研究科デザイン科学専攻 (正会員)

*2 千葉大学大学院 自然科学研究科デザイン科学専攻 (正会員)

*3 千葉大学助手 工学部建築学科 工修 (正会員)

*4 千葉大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

コンクリート水平圧縮束に作用する圧縮力 C1 が伝達されるとすると、図-1のように圧縮束端部で補強筋の引張力によって外部パネルに伝達され外部パネルではトラス機構を形成して外力に抵抗すると考えられる。一方、内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントは鉄骨フランジ内面から外部パネルに向かって作用する圧縮力 C2 の偶力によって、外部パネルに応力が伝達されると考えられる。従って、この応力伝達機構には、C1 と C2 の存在が不可欠となる。本報は、C1 に着目したモデル実験を解析により検証する。

2.2 解析対象試験体

西村等³⁾により行われた実験試験体を解析対象試験体とする。表-1に材料特性を、また、図-2に試験体詳細図および断面図を示す。RC の柱に S 梁の S フランジを模したシアキーを有する鋼板が2枚挿入された試験

表-1 材料特性

鋼材		降伏応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (× 10 ⁻⁶)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
プレート	PL5	4830	6370	2240	2.12 × 10 ⁻⁶
補強筋	D6	3490	5310	1860	1.88 × 10 ⁻⁶
補強筋	D10	3740	5260	2160	1.79 × 10 ⁻⁶
柱主筋	D16	3640	5420	1830	2.00 × 10 ⁻⁶
コンクリート		圧縮強度 (kgf/cm ²)		割裂強度 (kgf/cm ²)	
		304.0		22.8	
普通コンクリート					

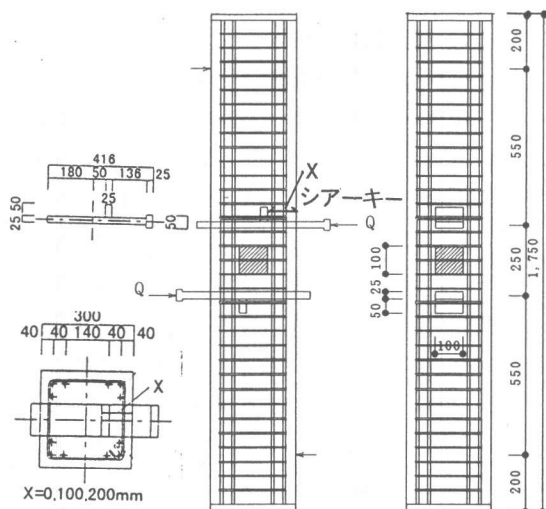


図-2 試験体詳細図および断面図

体で、柱側面からシアキーまでの距離をパラメーターとする3体 (X=0mm : X00, X=10mm : X10, X=20mm : X20) を解析した。なお、内部パネルに対応するコンクリート部分には空隙が設けられており、コンクリートと鋼板の間に付着応力が生じないようにグリースが塗布されている。

2.3 解析手法およびモデル化

本解析の複雑な応力伝達機構を解明するためには、接合部ディテールをできる限り実状に即した形状でモデル化することが重要になる。対象性を利用して要素分割を行い、対象となる面を面ローラー支持とした。解析は、S フランジを模した鋼板に荷重増分を与える単調載荷解析とし、内田、雨宮、米澤、野口等^{4), 5)}により開発された三次元有限要素解析プログラムを用いた。以下に、材料モデルの特徴を示す。

コンクリート要素：主応力、剛性等を要素内8個の積分点で評価する8節点ソリッド要素を用いた。また、コンクリートは直交異方性とし、Darwin-Pecknold等の等価一軸ひずみモデルを、Marry等が三次元的に拡張したものを使用した。破壊曲面には、5パラメータモデルを用いた。また、最大強度までの応力-ひずみ関係には Saenz 式、ひずみ軟化域には修正 Kent-Park モデルを用いた。ひび割れコンクリートの圧縮強度低減係数には、濱田・野口式⁶⁾を用いた。**プレート要素：**4節点の平面シェル要素を用い、Von-Misesの降伏条件式に基づく完全弾塑性モデルとした。**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モデルとした。**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。**接合要素：**米澤等⁴⁾が開発した接合要素を用い、鋼板とコンクリート間の開閉とすべりを表現した。なお、摩擦係数 0.01 とすることで、コンクリートと鋼板の間のグリースを考慮した。

結合要素：2つの平面を独立にモデル化し、その両平板が直角あるいは鋭角に交わる部分をこのリンク要素により結合した。

2.4 解析結果

実験における最終破壊状況を図-3に示す。表-2に解析結果一覧を示す。X00 及び X10 試験体の解析結果は、実験値と比べ、ひび割れ発生荷重、耐力ともに良い対応を示したが、X20 試験体においては、耐力を高めに評価している。また、解析における最終破壊状況においても、X00 は接合部にせん断ひび割れが多数発生したが、X10 はわずかに発生するのみで、X20 至ってはせん断ひび割れは生じなかった。これは、X20 試験体の支配的な破壊形式が接合部におけるせん断破壊ではなく、柱側面のコンクリート及び拘束筋が外面に押し出される破壊状況を呈した実験結果と対応している。図-4に荷重-相対すべり関係を示す。相対すべり量は、柱側面からの鋼板の抜け出し量 $S(\text{mm})$ である。図-5に荷重-せん断ひずみ角関係を示す。実験値に比べ、3体ともに剛性を高めに評価しているが、耐力における3体の相対関係は実験と同様の結果

表-2 解析結果一覧(梁貫通型)

		①ひび割れ発生荷重(tf)	②ひび割れ発生荷重(tf)	最大耐力(tf)	
X00	解析値	18.0	28.0	30.4	1.00
	実験値	21.6	26.7	34.3	0.89
X10	解析値	14.0	24.8	25.4	1.00
	実験値	15.3	24.6	26.8	0.95
X20	解析値	10.4	-	15.2	1.00
	実験値	4.5	-	11.2	1.36

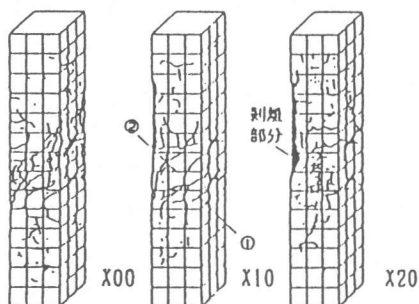


図-3 最終破壊状況

を得た。また、X00 の鋼板の抜け出し量に対し、X10, X20 は抜け出し量が大きく、せん断ひずみも小さい。この結果から、シアーキーの位置を柱側面よりに配置することが、柱梁接合部への応力伝達に効果的であることが分かる。各試験体の圧縮応力コンター図を図-6に示す。内部パネルでの応力伝達は行われておらず、コーナーに集中しているが、外部パネルに圧縮ストラットが形成されていることから、内部パネルから外部パネルへの応力伝達が立体的に行われていることが確認できる。3体の外部パネルでの応力図を比較すると、鋼板からの入力に対して X00 が最も幅広い圧縮ストラットを形成し、X10 に形成される圧縮ストラットは、X00 に比べて角度がやや急傾斜であり、X20 においては圧縮ストラットを形成しているとは言えない。ここでも、X00 試験体が、柱幅を最も有効に活

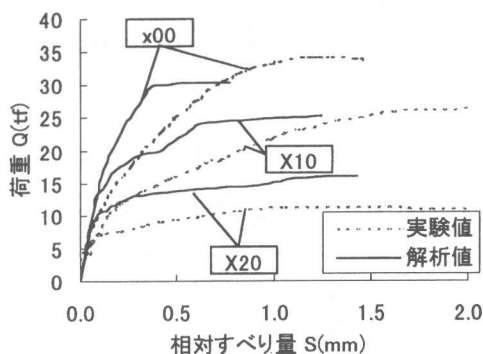


図-4 荷重-相対すべり関係

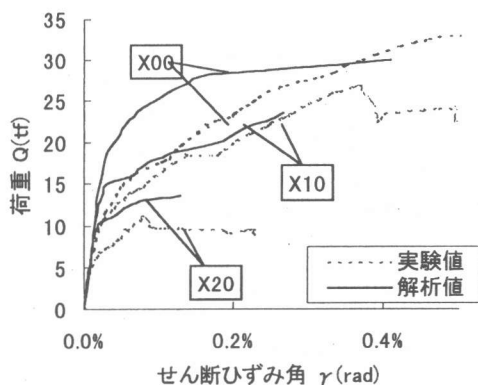


図-5 荷重-せん断ひずみ関係

用した圧縮ストラットを形成し、効果的な応力伝達を行っていることが確認できる。また、X20 試験体の外部パネルにおいて、圧縮応力

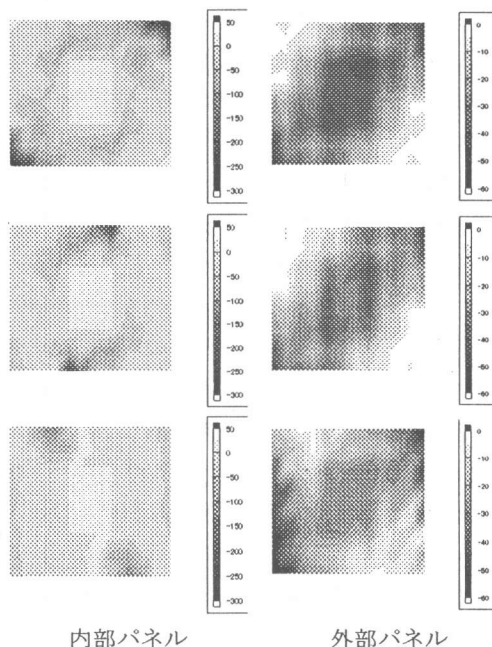


図-6 圧縮応力コンター図

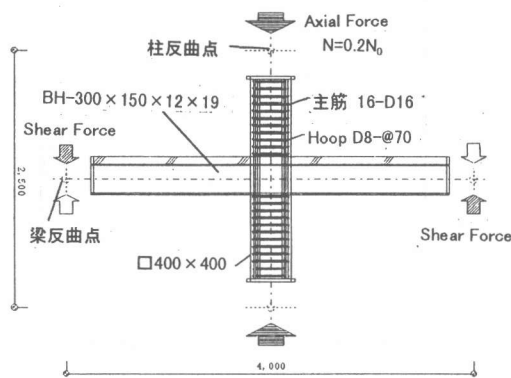


図-7 試験体立面図

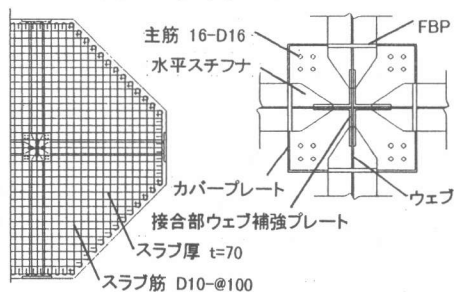


図-8 試験体平面図および詳細図

は柱側面に顕著に現れており、実験の押し抜き破壊状況と一致する。

3. 立体柱梁接合部

3.1 解析対象試験体

建設省建築研究所⁷⁾で行われた立体内柱梁接合部の2方向地震応答実験を解析対象試験体とし、柱貫通型の0度方向載荷試験体(BRI8)及び45度方向載荷試験体(BRI9)を解析した。また、実験では行われていないが、スラブの影響を検討するため、スラブ無し架構の仮想試験体(BRI8-0)をモデル化し、0度方向載荷のみ解析を行った。図-7に試験体立面図、及び図-8に試験体平面図および柱梁接合部の詳細図を示す。接合部コンクリートは、FBP及びカバプレートにより拘束されている。梁フランジ力は、梁延長線上の水平スチフナとL型の接合部ウェブ補強プレートにより、接合部ウェブに伝達され、接合部パネルの降伏を意図して設計されている。表-3に試験体諸元を、表-4に材料特性をまとめて示す。

3.2 解析手法およびモデル化

本解析は、コンクリート構成則に米澤、野口等⁸⁾により開発されたユーザーサブルーチンを組み込んだ汎用FEM解析プログラムABAQUSにより行った。本解析のように入力データも複雑で、要素数も多く、計算量が膨大になる三次元FEM解析には、ABAQUSのような汎用プログラムが適していると思われる。0度方向載荷のBRI8-0、BRI8では、対象性を利用して要素分割を行い、対象となる面を面ローラー支持とした。加力は、柱頭部に一定軸力を加えた後梁端に荷重を与えた。材料モデルは、2.3節で述べたものと同じのモデルを用いた。なお、付着に関しては完全付着とし、コンクリート要素とプレート要素は節点を共有し、重ね合わせて用いた。これは、周辺のカバプレートとFBPからなる鋼板枠が接合部内のコンクリートを抱え込む

ように接合部全体が変形するため、鋼板とコンクリート間の相対的なずれの影響は小さいものと考えたためである。

表－3 試験体諸元

試験体名		BRI8-0	BRI8	BRI9
接合部	ウェブ	PL6(SS400)		
	水平スチフナ	PL19(SM490)		
	カバープレート	PL6(SS400),h=440		
	FBP	t=12(SS400),b=150,h=440		
	断面	BH-300×150×12×19		
	断面	B×D=400×400		
	主筋	16-D16(P _g =1.99%,SD390)		
	HOOP	4-D8@70(P _w =0.71%,KSS800)		
RCスラブ		-	t=70,D10@100SD295	
作用軸力		0.2×b×D×σ _B		
載荷方法		0度方向載荷		45度方向載荷

表－4 材料特性

材料	寸法	分類	降伏応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
鋼材	PL6	SS400	3110	4210	2.01×10 ⁶
	PL12	SS400	2690	4370	2.19×10 ⁶
	PL13	SM490	3700	5380	2.16×10 ⁶
	D16	SD390	4820	6790	1.74×10 ⁶
	D8	KSS800	9350	10950	1.72×10 ⁶
	D10	SD295	3560	5070	1.78×10 ⁶
	D6	SD295	3360	5340	1.72×10 ⁶
コンクリート	Fc270		290 [*] (スラブから下)		
	Fc270		260 [*] (上柱)		

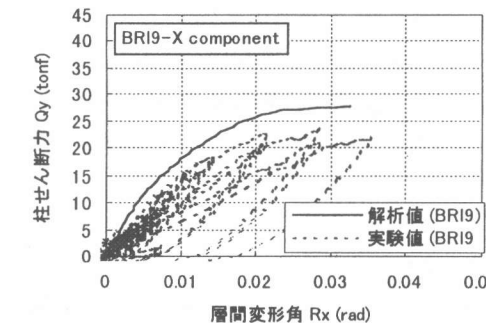
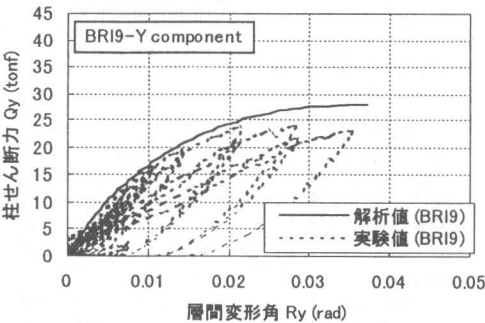
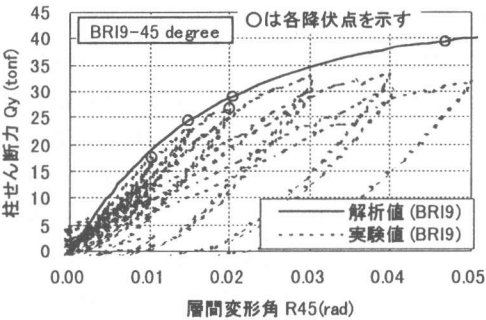
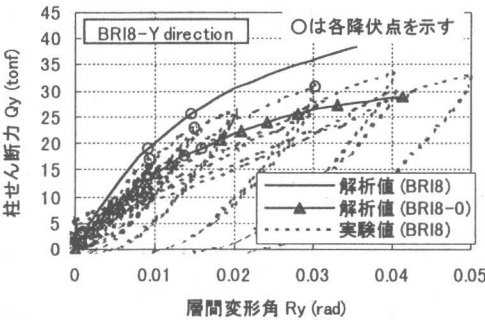
*:Compressive Strength (kgf/cm²)

3.3 解析結果

図－9に柱せん断力－層間変形角関係を示す。BRI8 及び BRI9 ともに実験値と比較すると、耐力を高めに評価し、BRI8 及び BRI9 の X 方向成分においては、剛性も高めとなった。一方、BRI9 の 45 度及び Y 方向成分の剛性は、実験値と良好な対応を示した。また、BRI8 は最大耐力まで追跡し得なかったが、BRI8 と BRI9 の解析値を比較すると、BRI8 に比べ BRI9 の剛性の方が、若干下回る結果となった。なお、BRI9-45degree の値は、X、Y 方向成分より 45 方向の値を算出したものである。表－5に解析結果一覧を示す。接合

表－5 解析結果一覧(立体柱梁接合部)

		接合部 ウェブ (rad)	L型補強 プレート (rad)	柱主筋 (rad)	最大耐力 (tf)
BRI8-0	実験値	-	-	-	-
	解析値	1.3%	1.6%	-	28.8
BRI8	実験値	1.0%	1.5%	3.0%	33.3
	解析値	1.0%	1.5%	-	38.4
BRI9	実験値	1.0%	2.0%	2.0%	33.4
	解析値	1.5%	2.0%	4.5%	41.0



図－9 柱せん断力－層間変形角関係

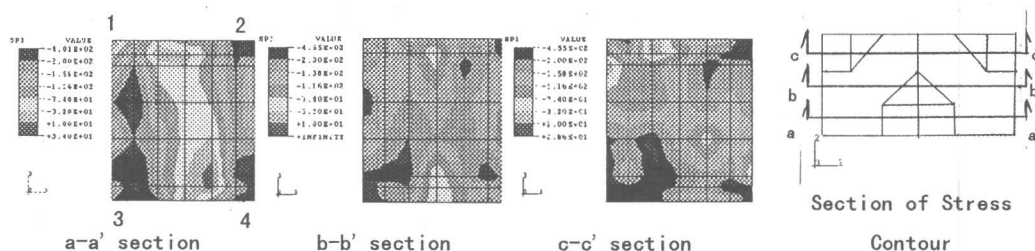


図-10 圧縮応力コンター図 (BRI8)

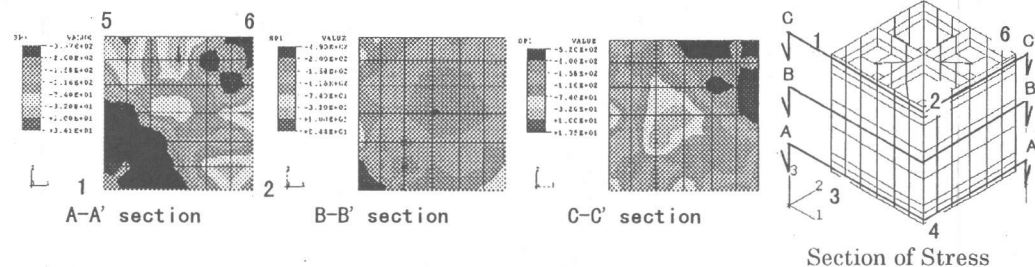


図-11 圧縮応力コンター図 (BRI9)

部ウェブ、L 型補強プレートの降伏状況は実験と概ね対応するが、柱主筋は実験と一致せず、BRI8 では降伏せず、BRI9 では層間変形角 4.5%で降伏した。この要因として、完全付着モデルを用いていることが考えられる。図-10 に BRI8 の圧縮応力コンター図を示す。接合部の鉄骨ウェブパネルに接する接合部コンクリート(断面 c-c')においては、対角線上に圧縮ストラットが形成されており、外部パネル(断面 a-a')に向かうにつれ、圧縮ストラットは接合部ウェブにより分断され、カバープレートに接する接合部コンクリート(断面 a-a')においては、ほぼ垂直な 2 つの帯を形成している。図-11 に BRI9 の圧縮応力コンター図を示す。接合部中央(断面 B-B')では、中心に応力が集中しており、接合部上部(断面 C-C')から接合部下部(断面 A-A')へ、斜め対角線方向に圧縮ストラットが形成されている。

4. まとめ

(1)内部パネルから外部パネルへの応力伝達機構及び加力方向の違いによる応力の流れ

を三次元解析により立体的に把握することができた。(2)シアーキーを柱側面よりに配置する方が、応力伝達の効率が良いことがわかった。(3)45 度加力の方が 0 度方向加力に比べ、若干低い剛性を示した。

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・東京大学名誉教授)の一環として行われ、RCS 分科会(主査：野口博千葉大学教授)では、貴重なご意見ご助言をいただきました。

参考文献

- 1) 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 年 12 月 2) 例えば, 北山和宏ほか: スラブ付き立体柱・梁接合部の挙動, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.649-652, 1986 年, 黒瀬行信: 鉄筋コンクリート造柱-梁接合部の一方および二方向加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 第 448 号, pp.89-99, 1993.3.) 山本淳二, 鳥居拓川端淳, 本田勝敏, 馬場望三, 小山高志, 山下恵司, 山地貴裕, 西村泰志: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (RCS-9) (RCS-23) (RCS-26)(RCS-27), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.897-898, 1995.8, pp.1125-1126, 1996.9, pp.1061-1064, 1997.9, 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, 1994.5) 雨宮篤, 内田和宏, 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~その 2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.1061-1064, 1992 年 8 月 6) 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.17-2227, 1989.10.7) 西山功: 柱鉄筋コンクリート造, 梁鉄骨造よりなる立体柱梁接合部の 2 方向地震応答 RCS 分科会資料 8) 米澤健次: コンクリート系構造部材の非線形有限要素解析手法の開発とせん断抵抗機構の分析, 千葉大学工学部自然科学研究科博士論文, 1995.1