

論文

[2167] 内蔵鉄骨断面の形状が鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ破壊性状に及ぼす影響

上原 広^{*1}・西村泰志^{*2}・南 宏一^{*3}

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造(RCという)柱が2方向外力を受ける場合、1軸曲げ時よりも曲げ変形能力が乏しいことが示されている[1][2][3]。このような厳しい応力状態に対しては、RC柱と比べて優れた靱性を発揮する鉄骨鉄筋コンクリート構造(SRCという)柱[4]によることが望ましいと考えられる。すなわち、2方向外力に対しては2方向にH形鋼が配される十字形鋼SRC(+SRCという)柱を用いることにより、優れた曲げ変形能力が期待できると考え研究に着手した。しかしながら、従来のSRC構造に関する研究の多くはH形鋼を内蔵するSRC(H-SRCという)柱の実験結果に基づくものであり、十字形鋼を内蔵するSRC柱に関する研究の蓄積は少ない[5][6]。そこで筆者らは、弱軸側鉄骨の有無に問題点を絞り、内蔵される鉄骨断面形状の差異が2方向外力を受けるSRC柱の曲げ破壊性状に及ぼす影響を調べるため、計4体のSRC柱試験体を用いた実験を計画した。本報では、実験結果とその考察結果について述べる。

2. 実験計画

実験変数は弱軸側鉄骨の有無、載荷経路の2種類である。図-1に実験変数を示す。弱軸側鉄骨の有無に従い、鉄骨断面は十字形鋼、H形鋼の2種類が選択され、載荷経路は1軸曲げ、8字載荷の2種類が選択された。8字載荷では同時に2方向から載荷されるものである。これらを組合せ計4体の試験体

載荷経路	1軸曲げ	8字載荷
断面形状		
	CA4	CB4
	HA4	HB4

図-1 実験変数

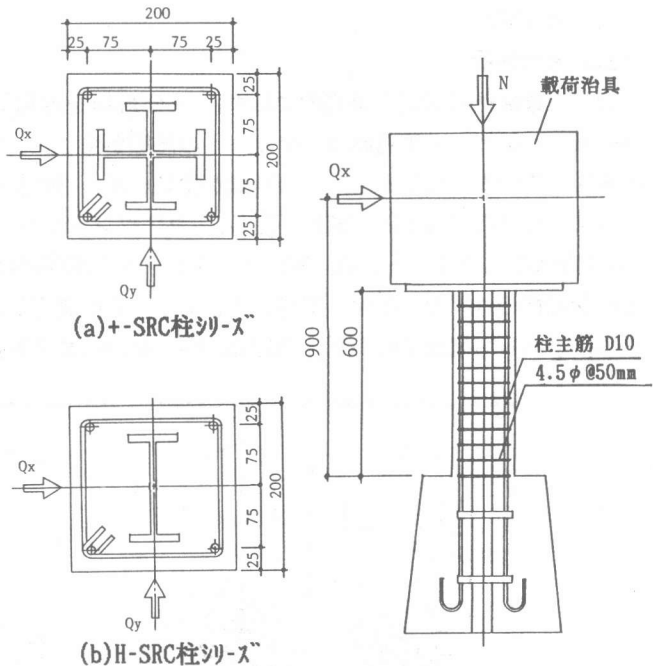


図-2 試験体の形状寸法

*1 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修(正会員)

*2 大阪工業大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 福山大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

を計画した。図-2に試験体の形状寸法を示す。試験体は片持ち柱形式であり、 $b \times D = 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の正方形断面である。RC部分の配筋は共通であり、主筋は 4-D10($p_t = 0.39\%$ 、 p_t ; 引張主筋比)、せん断補強筋は 4.5ϕ を 50mm 間隔($p_w = 0.32\%$ 、 p_w ; せん断補強筋比)で配筋した。鉄骨断面の基本形状は H-125x60x6x8(材質は SS41)であり、十字形鋼はこれらを組み立て製作された。コンクリートの設計規準強度は $F_c = 240\text{kgf/cm}^2$ である。表-1に使用材料の力学的性質を示す。実験は柱部材の相対部材角 R_i

($=\Delta/h\Delta_i$; 柱頭の水平変位)を制御基準とした漸増変位制御法により行われた[3]。柱頭位置は、載荷治具の加力中心部とした。載荷は 3基のアクチュエーターにより試験体頭部の載荷治具を介し行われた。同一変位振幅では 2回の繰返し載荷を行い、鉄骨断面が強軸曲げとなる方向を主たる方向(y方向)とした。なお、一定軸力として $N = 0.4 \cdot N_{uc}$ (N_{uc} ; 柱の終局圧縮耐力)を作用させた。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-3に最終破壊状況を模式的に示す。十字形鋼を内蔵する CA4、CB4では初期曲げひびわれの発生後、 $R = 0.01\text{rad}$ で材端コンクリートの圧壊が生じた。変形の増大と共にコンクリートの圧壊は進展してかぶりコンクリートの剥離が生じるが、剥離区間は $1.5 \sim 2.0D$ (D ; 柱せい)に達した。 $R = 0.03\text{rad}$ 以後には主筋の座屈が生じ、コアコンクリート部分にまで圧壊が進んだ。CB4では x 、 y の2方向に載荷されるため、材端コンクリートの圧壊は柱側面全面に及び、 $R = 0.05\text{rad}$ になると鉄骨近傍のコア部分を残して材端コンクリートは剥落した。CA4、CB4共にせん断補強筋のフックの抜け出しも観察されるが、軸力は $R = 0.05\text{rad}$ まで保持された。H形鋼を内蔵する HA4、HB4

表-1(a) 鋼材の力学的性質

	σ_y (kgf/cm ²)	ϵ_y ($\times 10^{-3}$)	σ_u (kgf/cm ²)	σ_u / σ_y
t=0.8mm(フランジ)	3018	1452	4193	1.39
t=0.6mm(ウェブ)	2988	1440	4090	1.37
D10	3425	1855	5108	1.49
4.5 ϕ	3317	1874	4643	1.40

表-1(b) コンクリートの力学的性質

σ_B (kgf/cm ²)	σ_t (kgf/cm ²)	σ_t / σ_B
242.7	19.1	0.079

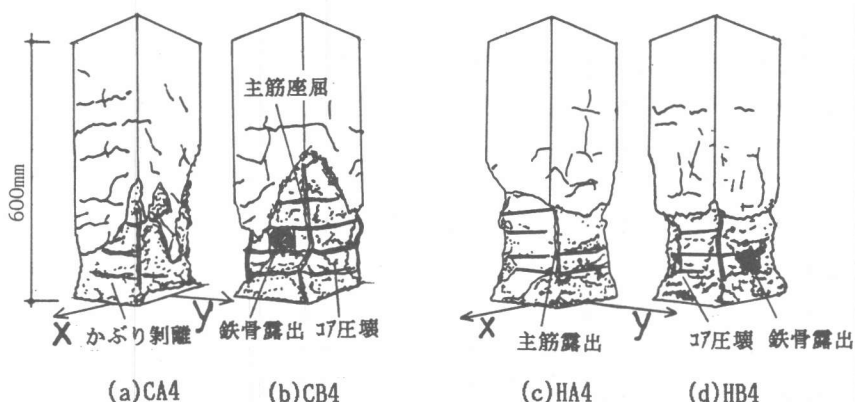


図-3 最終破壊状況

でも初期曲げひびわれの発生後、 $R=0.01\text{rad.}$ で材端コンクリートの圧壊が生じた。変形の増大と共に圧壊区間は増加し、材端部から $1.5D$ のかぶりコンクリートはほぼ剥落した。HA4ではコアコンクリートにまで圧壊が進展するものの、 $R=0.05\text{rad.}$ まで軸力が保持された。HB4では材端コンクリートの圧壊の進展は著しく、 $R=0.03\text{rad.}$ の x 方向への載荷時に軸力が保持できなくなり柱は崩壊した。これは材端部の鉄骨に座屈が生じたためと考えられるが、コアコンクリートにまで圧壊が進展し、鉄骨を拘束しその座屈を防止する働きが失われたためと推察される。

3.2 履歴曲線

図-4に履歴曲線を示す。縦軸は主たる方向の作用せん断力 $Q_y(\text{tf})$ であり、横軸は相対部材角 $R_y(\text{rad.})$ である。図中、一点鎖線は一般化累加強度式による終局曲げ耐力値 Q_{ru} (理論耐力という) であり、塑性ヒンジの形成位置が材端にあると仮定して求めた。図中の記号は鉄骨、主筋の降伏時を示している。なお、転倒モーメントの影響は取り除いてある。図-5に履歴曲線の包絡線を示す。縦軸は作用せん断力 $Q_y(\text{tf})$ であり、横軸は相対部材角 $R_y(\text{rad.})$ である。図中、実線は1軸曲げ時の実験値、破線は8字載荷時の実験値を示している。

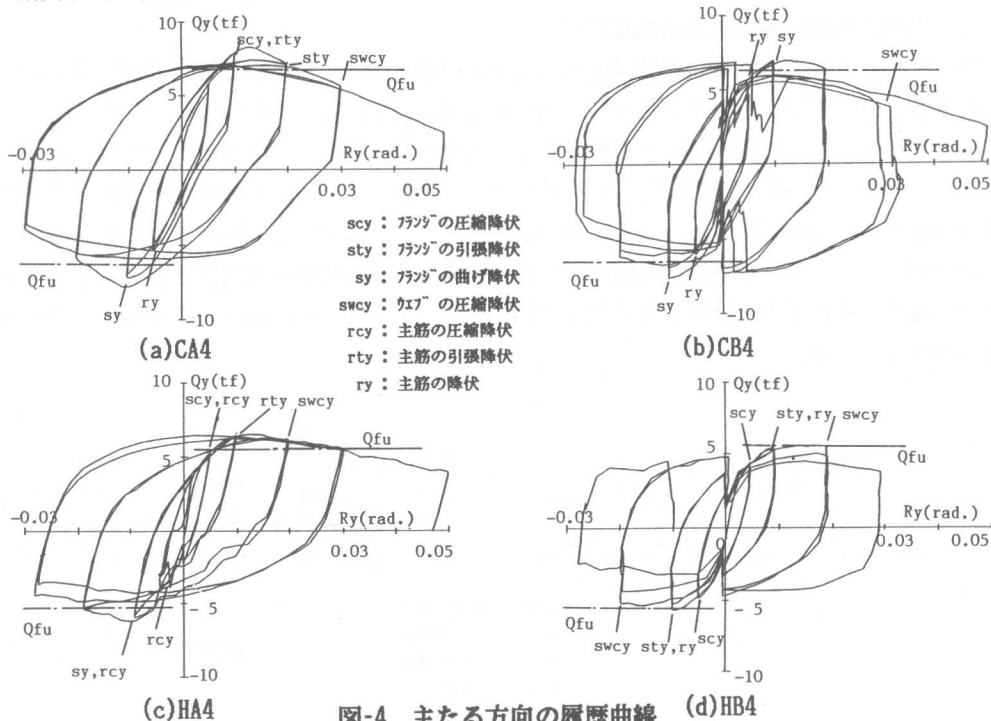
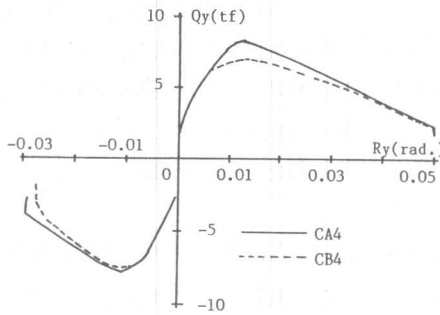
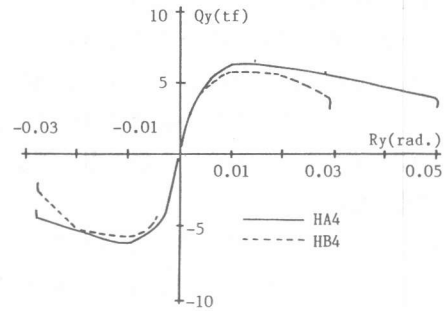


図-4 主たる方向の履歴曲線

何れの試験体とも鉄骨フランジ、主筋の圧縮降伏以後、 $R=0.01\text{rad.}$ で最大耐力に達し、その値は理論耐力より高い。載荷経路の差異に関して最大耐力の差は見られないが、弱軸側鉄骨を持つことにより最大耐力は1~2割程度高く示される。最大耐力以後、十字形鋼を内蔵するCA4、CB4では $R=0.02\text{rad.}$ まで理論耐力が確保され、以後、部材耐力は緩やかに劣化するが軸力は $R=0.05\text{rad.}$ まで保持された。図-5(a)から載荷経路の差異に拘らず、両試験体の部材耐力の劣化勾配に余り差は観察されない。一方、H形鋼を内蔵するHA4では $R=0.02\text{rad.}$ まで理論耐力が保たれ、以後、部材耐力は緩やかに劣化する。HB4では材端コンクリートの圧壊は著しいが、 $R=0.02\text{rad.}$ まで理論耐力が確保された。 $R=0.03\text{rad.}$ には部材耐力は大きく劣化し、 x 方向載荷時に鉄骨が座屈して柱は崩壊した。図-5(b)からもHB4では最大耐力以後の曲げ変形能力が乏しいことが分かる。



(a) 十字形鋼を内蔵する場合



(b) H形鋼を内蔵する場合

図-5 履歴曲線の包絡線

4. 弱軸側鉄骨の有無が SRC柱の曲げ破壊性状に及ぼす影響

4.1 各構造要素の負担軸力の推移状況

図-6に無次元化された各構造要素の負担軸力の推移を示す。縦軸は負担圧縮力 iN をその終局圧縮耐力 iN_{uc} で除した無次元化量 $\bar{i}n = iN / iN_{uc}$ 、横軸は相対部材角 $R(\text{rad.})$ を表している。2方向外力時の値は $R_x = 0$ のまま R_y のみを変化させた時に得られたものである。図中、●-●はコンクリート要素、■-■は主筋要素、□-□はフランジ要素、▲-▲はウェブ要素、◆-◆は弱軸側鉄骨要素に関する実験値を示している。鋼材要素に関する実験値はひずみゲージの測定値から求められたが、コンクリート要素の負担軸力は作用軸力値と鋼材要素の負担軸力値の差として求められた。なお、鋼材要素ではひずみ硬化は生じないものと考え、その応力ひずみ関係をバイリニア形と仮定している。

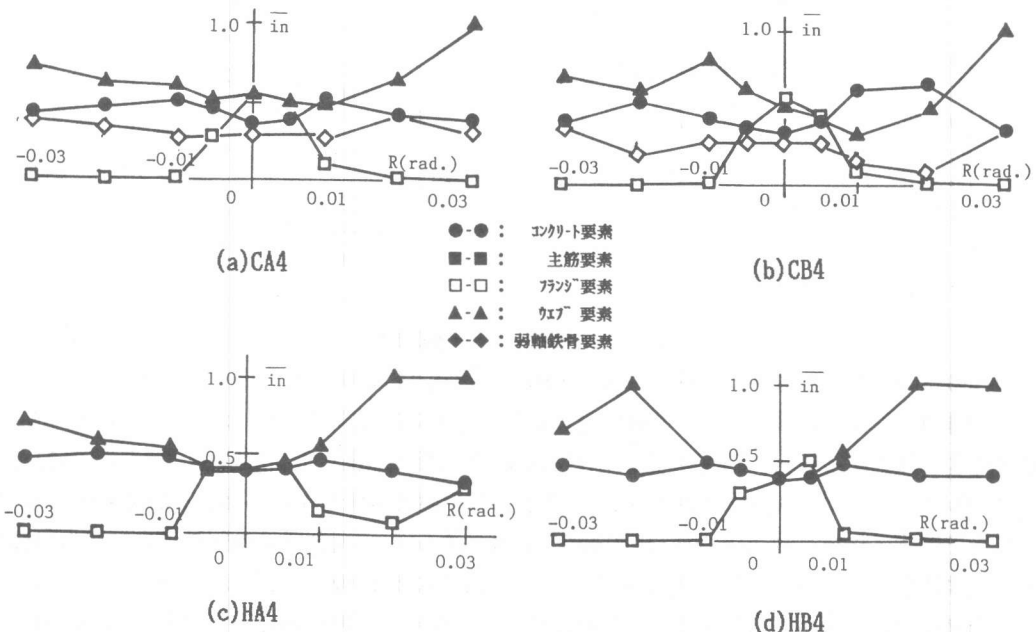


図-6 無次元化された各構造要素の負担軸力の推移状況

図-6(a)、(b)から十字形鋼を内蔵する CA4、CB4では $R=0.005\text{rad.}$ までの弱軸側鉄骨要素の負担値は低い、他の要素の負担値は $iN/iN_{uc}=0.4\sim 0.5$ である。 $R=0.01\text{rad.}$ 以後にフランジ要素は純曲げ状態に達し負担圧縮力はほぼ零になる。一方、コンクリート要素の負担圧縮力は増大し $iN/iN_{uc}=0.5\sim 0.7$ に達する。ここで CB4の値が高く示されるが、x方向にも載荷を受けたためと推察される。また、CA4、CB4ともに $R=0.03\text{rad.}$ には材端コンクリートの圧壊に伴いコンクリート要素の負担圧縮力は減少し、弱軸側鉄骨要素の負担値は増大しウェブ要素は圧縮降伏することが示されるが、載荷経路による大きな差は観察されない。図-6(c)、(d)から H形鋼を内蔵する HA4、HB4では $R=0.005\text{rad.}$ までの各要素では負担値は $iN/iN_{uc}=0.4$ である。 $R=0.01\text{rad.}$ 以後にフランジ要素は純曲げ状態に達し負担圧縮力はほぼ零になる。HA4ではコンクリート要素の負担圧縮力はほぼ一定だが、 $R=0.02\text{rad.}$ 以後の正載荷時のみにウェブ要素の圧縮降伏が観察される。HB4では $R=0.02\text{rad.}$ の正負載荷時ともにウェブ要素は圧縮降伏し、 $R=0.03\text{rad.}$ の負載荷時にはコンクリート要素の負担圧縮力は増加するがウェブの負担圧縮力は減少することが示される。この直後に柱は軸力を保持できなくなり崩壊した。H形鋼を内蔵する HA4、HB4では十字形鋼を内蔵する CA4、CB4と比べて何れもウェブ要素が圧縮降伏する傾向があるが、これは弱軸側鉄骨を持たないため、材端コンクリートの圧壊後に鉄骨部分に再配分される軸力がウェブ要素のみに移るためと考えられる。一方、十字形鋼を内蔵する CA4、CB4では弱軸側鉄骨、ウェブ要素の両者に軸力が移るため、ウェブ要素の圧縮降伏は遅らされると推察される。HB4では x、y の 2方向から載荷され材端コンクリートの圧壊が周囲全面に渡ると述べた。このためコンクリート要素からウェブ部分に移る圧縮力が HA4より高く、ウェブ要素の圧縮降伏が早くなり、鉄骨の座屈が $R=0.03\text{rad.}$ に生じて柱の曲げ変形能力が低く示されたと考えられる。

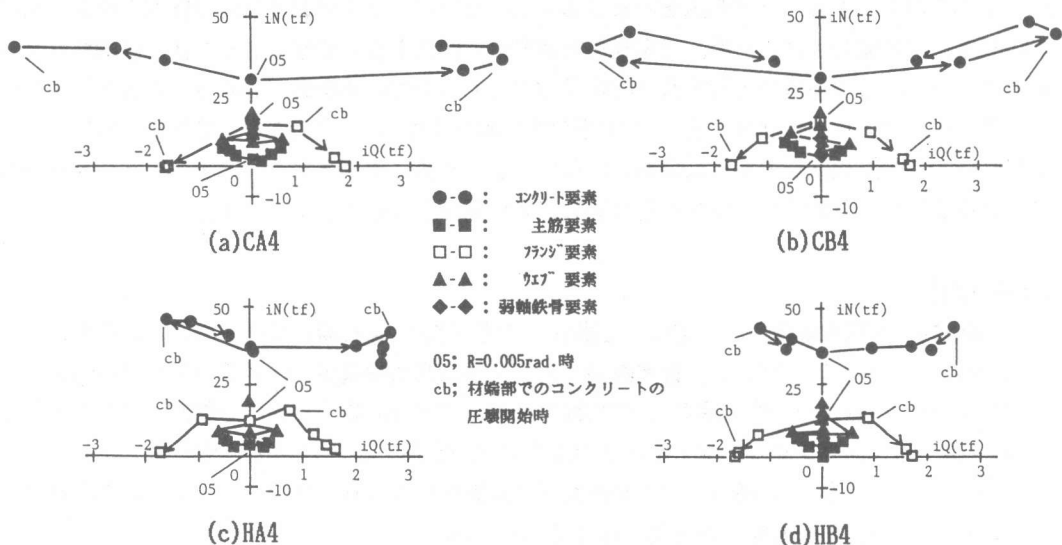


図-7 各構造要素の負担耐力の推移状況

4.2 各構造要素の負担耐力の推移状況

図-7には各構造要素の負担耐力の推移を示す。縦軸は負担圧縮力 $iN(tf)$ 、横軸は負担せん断力 $iQ(tf)$ を表している。図中の記号 05は $R=0.005\text{rad.}$ 時、cbは材端コンクリートの圧壊開始時をそれぞれ示している。 iQ の算定に際して、材端部に塑性ヒンジが形成されると仮定した。

図-7(a)、(b)から十字形鋼を内蔵する CA4、CB4では材端コンクリートの圧壊後、フランジ要素は純曲げ状態に達しその負担曲げ耐力は増大する。一方、ウェブ、弱軸側鉄骨要素では負担曲げ耐力の増加がほとんどなく、専ら負担圧縮力が増大する。コンクリート要素では負担圧縮力、負担曲げ耐力は共に上昇する。圧壊後には、その負担圧縮力は余り低下しないが、負担曲げ耐力は急激に低下する。しかしながら、これはフランジ要素の曲げ耐力の増加に補われる傾向にあり、2方向外力を受ける CB4では顕著に観察される。これは柱面全面に渡りかぶりコンクリートが剝離するためと考えられる。図-7(c)、(d)から H形鋼を内蔵する HA4、HB4では、材端コンクリートの圧壊後には軸力の再配分が生じ、コンクリート要素の負担曲げ耐力は減少する。一方、フランジ、主筋要素は純曲げ状態に至ってその負担曲げ耐力は増加し、コンクリート要素の負担曲げ耐力の劣化を補う傾向にある。2方向外力を受ける HB4ではコンクリート要素の最大負担曲げ耐力は HA4より低いが、コンクリート要素の圧壊が早いと考えられる。弱軸側鉄骨の有無に拘らずコンクリート要素の負担圧縮力はほぼ同程度だが、H形鋼を内蔵する場合にはコンクリート圧壊後の負担圧縮力の低下は大きい。前述したように H形鋼が内蔵される場合では、弱軸側鉄骨がないため圧壊後のコンクリート要素の負担圧縮力は専らウェブ要素に移り、このためウェブの圧縮降伏が早期に生じると考えられる。以上の結果から、本実験では弱軸側鉄骨の有無により柱の最大耐力は向上は 1~2割程度であるものの、材端コンクリートの圧壊後に鉄骨部分に移る圧縮力を負担する働きを持つため、柱の靱性の向上には大きく貢献すると推察される。

5. 結語

SRC柱では、最大耐力以後の材端部のコンクリートの圧壊に伴い、ウェブ要素に圧縮軸力が再配分される傾向にある。十字形鋼を内蔵される SRC柱では、ウェブおよび弱軸側鉄骨要素の両者に圧縮軸力が再配分されるため、H形鋼を内蔵する SRC柱よりも靱性に富んだ曲げ破壊性状が示される。また、H形鋼を内蔵する SRC柱が 2方向外力を受ける場合、弱軸方向載荷時に材端部の鉄骨に座屈が生じ柱は崩壊する。十字形鋼を内蔵する場合、2方向外力を受けるにも拘らず弱軸側鉄骨を持つため鉄骨の座屈は観察されない。このため、十字形鋼を内蔵する SRC柱では 2方向外力を受けるにも拘らず、優れた曲げ変形能力が発揮されることが示された。

〔参考文献〕

- 1) 岡田恒男、関松太郎ほか：定軸力と繰返し 2方向曲げ・せん断を受ける鉄筋コンクリート柱の復元力（その 1、その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1447-1450、1976.10
- 2) 李 康寧、小谷俊介、青山博之：変動軸力と水平 2方向地震力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動、第 8回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.489-492、1986.6
- 3) 上原 広、南 宏一：繰返し 2方向の曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状、コンクリート工学年次論文報告集、pp.187-192、1987.7
- 4) 若林 實、南 宏一、谷 資信、平野道勝：合成構造の設計、新建築学大系 42、彰国社、pp.97-102、1986
- 5) 木村 衛、沢田 博、斎藤勝彦：曲げ降伏型鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状、日本建築学会論文報告集、pp.31-39、1981.8
- 6) 西岡雅明、宮内靖昌、西村泰志、南 宏一：高強度コンクリートを用いた SRC柱の終局曲げ耐力と変形性能、コンクリート工学年次論文集 12-1、pp.455-460、1990.6