

論文 横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の中心圧縮実験

河本 裕行^{*1}・堺 純一^{*2}・松原 佳毅^{*3}

要旨: SRC柱部材から主筋およびせん断補強筋を省き、薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成断面を対象として、内蔵鉄骨および横補強鋼管によるコンクリートの拘束効果を調べるために中心圧縮実験を行った。実験変数として内蔵鉄骨の有無とその形状および横補強鋼管の幅厚比を選んだ。実験結果より、十字鉄骨を内蔵しておけば、大きな圧縮強度の昇が期待できることが明らかになった。本報では、鋼管の幅厚比および内蔵鉄骨形状の違いがコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を検討し、本合成断面におけるコンクリートの拘束効果について調べる。

キーワード: 中心圧縮, 鉄骨コンクリート柱, 横補強鋼管, 幅厚比, 圧縮耐力, 拘束効果

1. 序

鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRC）構造は、優れた構造性能を持ち、耐震構造として一般に認知されているが、鉄骨加工や主筋およびせん断補強筋などの配筋作業が必要となり、建設コストが高くなる傾向にある。さらに柱梁接合部付近での鉄骨および鉄筋の収まりが複雑になり、施工性の点でも解決すべき点がある。そこで、鋼コンクリート合成構造として作業が容易で、SRCと同等以上の耐震性能を示す新しい合成構造の開発も重要な課題である。

本研究は、SRC構造に対する耐震性能の更なる向上と、建設工事における省エネルギー化・省力化・省人化を目指した鋼・コンクリート合成柱材を開発することを目的として、SRC部材から主筋

および横補強筋を省き、薄肉鋼管で横補強を行った、図-1に示す断面を対象とする鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性挙動を調べるものである^{1),2)}。本柱材は、高軸力に対してウェブと弱軸フランジが抵抗できるよう十字鉄骨を挿入しており、さらに、十字鉄骨で囲まれたコンクリートは横拘束されるため、材料強度を用いた計算曲げ耐力に対する耐力上昇が大きく見込まれる。また、SRC柱材はかぶりコンクリートが圧壊することにより抵抗力が低下するが、本柱材は十字鉄骨の外側のコンクリートを薄肉鋼管で横拘束するので、大変形時でも耐力低下は少なく、さらに内蔵鉄骨に高強度鋼を使用して断面を小さくできるメリットがあると考えられる。この鋼管はコンクリートを横拘束するためのもので軸方向応力に抵抗しないように柱の上下端部で隙間を設ける想定にしており、耐火被覆は軽減できると考えている。鋼管を使用した同様な合成構造にコンクリート充填鋼管（以下CFT）柱材があるが、CFT柱材の鋼管は曲げおよび軸力に抵抗させるが、本構造の鋼管は十字鉄骨の外のコンクリートのみの横拘束を目的としているため、幅厚比が100を超えるような非常に薄い鋼管でも効果を発揮できると考えられる。また、CFT柱材に取り付く梁は基本的には鉄骨梁に限られるが、本柱材では鉄骨梁の他にRC梁、SRC梁

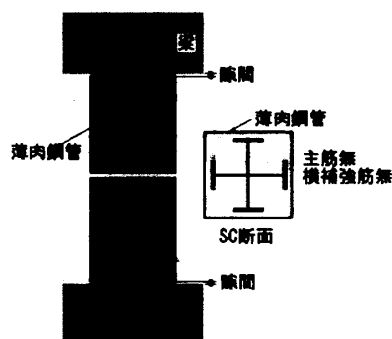


図-1 横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材

*1 福岡建設専門学校 講師・修士(工学) (正会員)

*2 福岡大学 教授・博士(工学) (正会員)

*3 井森工業株式会社 修士(工学)

表-1 試験体一覧

番号	試験体	H形鋼寸法			横補強鋼管		$c\sigma_B$ (N/mm^2)	試験体数
		内蔵鉄骨 形状	寸法	フランジ 幅厚比	板厚 (mm)	幅厚比		
			(mm)					
1	CH-125	十字鉄骨	CH-160×80×4.5×6	6.7	1.6	125	41.6	2
2	CH-87				2.3	87		2
3	CH-44				4.5	44		2
4	MH-125	単一H形鋼	H-160×80×4.5×6	6.7	1.6	125		2
5	MH-87				2.3	87		2
6	MH-44				4.5	44		2
7	N-125	無			1.6	125		2
8	N-87				2.3	87		2
9	N-44				4.5	44		2
10	CH	十字鉄骨	CH-160×80×4.5×6	6.7	無			2

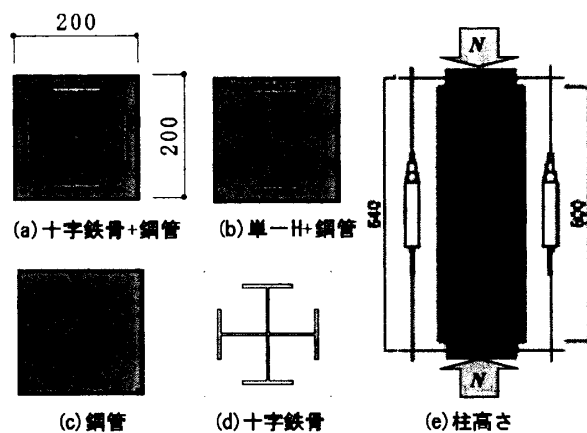


図-2 試験体形状および載荷方法

とすることも容易であり、接合部の製作もかなり軽減できるものと考えられる。

崎野・孫らは、鋼管により横補強された鉄筋コンクリート柱材の弾塑性挙動を調べ、鋼管による横補強の有効性を明らかにしている³⁾。本研究では、十字鉄骨により囲まれたコンクリートの横拘束が大きくなることが期待されるため、RC柱材に対する横補強鋼管に比べ、かなり幅厚比を大きくしても構造性能を損なうことはないものと考えられる。倉本らはCES構造の研究開発を行っているが、コンクリートの剥落防止にSFCを使用していることが本研究との違いである⁴⁾。

内蔵鉄骨の有無、内蔵鉄骨形状の違い、および鋼管の幅厚比の違いがコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べるためにスタブカラムの中心圧縮実験を行った。柱材の水平力載荷実験を行った結果、計算耐力に対する実験耐力が、1.2倍程度

発揮されていることから、この要因の1つとしてコンクリートの拘束効果による強度上昇があるものと考えられ、本論では、コンクリートの圧縮強度上昇率について検討した。

2. 実験計画

2.1 試験体

内蔵鉄骨の有無と形状(十字鉄骨, 単一H形鋼)および鋼管の幅厚比(125, 87, 44)がコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べるためにスタブカラム試験体を計20体製作し、中心圧縮実験を行った。試験体の寸法は $b \times D = 200 \times 200$ (mm)とし、柱材長を600mmとした(図-2参照)。試験体の実験変数を表-1に示す。内蔵鉄骨はウェブに4.5mm厚の鋼板を、フランジに6mm厚の鋼板を用い、溶接して形鋼を製作している。横補強鋼管の幅厚比

表-2 コンクリートの機械的性質

$c\sigma_B$ (N/mm^2)	E_c (GPa)
41.6	24.6

$c\sigma_B$: シリンダー圧縮強度, E_c : ヤング係数

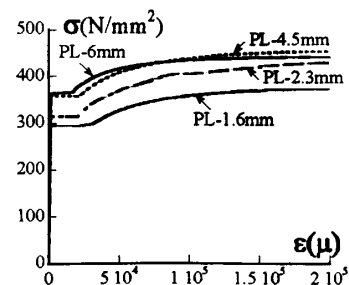


図-3 使用鋼材の応力ひずみ関係

表-3 鋼材の機械的性質

部材名	規格	$t(\text{mm})$	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	伸び(%)	降伏比
ブランジ	SS400	6.0	376.8	450.8	34	0.84
ウェブ・横補強鋼管	SS400	4.5	349.6	447.6	35	0.78
横補強鋼管	SS400	2.3	303.9	402.9	32	0.73
横補強鋼管	SPHC	1.6	295.0	375.0	35	0.79

t :板厚, σ_y :降伏点強度, σ_u :引張強度

は鋼管の板厚を変化させることにより調整している。鋼板は4.5mmと2.3mm厚のSS400鋼材および1.6mm厚のSPHC鋼材を使用し、断面の4隅を溶接することにより製作した。これらの材料について、表-2にコンクリートの機械的性質、表-3に鋼材の機械的性質、図-3に鋼材の応力ひずみ関係を示している。

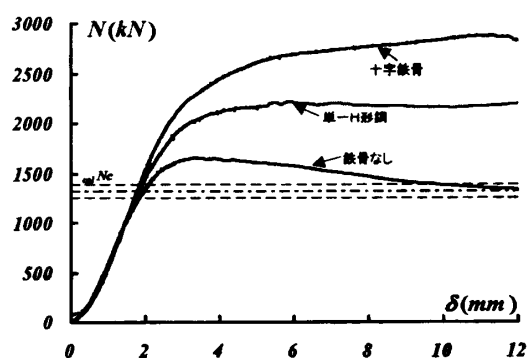
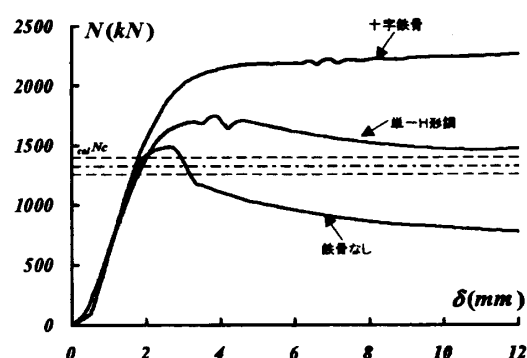
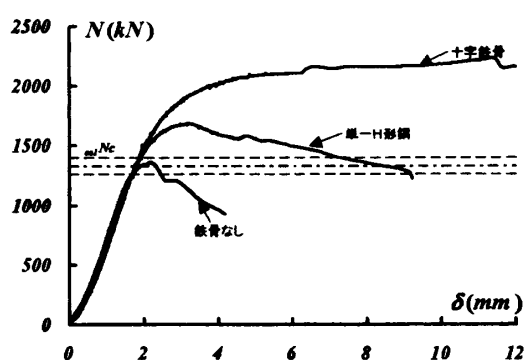
2.2 載荷方法

図-2(e)に示す状況で、鋼管はコンクリートを横拘束するためのものであり、鋼管に圧縮力を負担させないように加圧板を介してコンクリートのみに圧縮力を載荷した。また、内蔵鉄骨によるコンクリートの横拘束効果を明らかにするためにスタブカラムの上部において内蔵鉄骨の上断面に10mmのスチレンボードを貼付け、内蔵鉄骨も圧縮軸力を負担させないようにしている。圧縮力は3000kN万能試験機の荷重計で、軸変形は上下の加圧板間の相対変形を変位計で測定した。

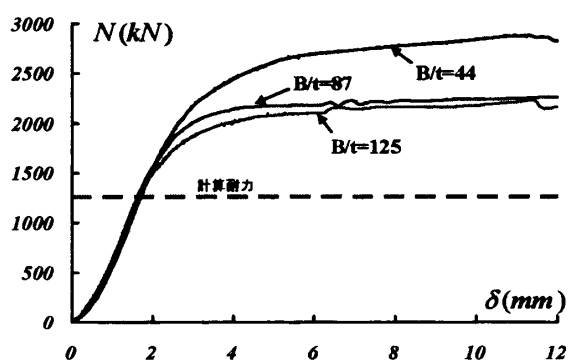
3. 実験結果

図-4および図-5に圧縮軸力と軸縮みの関係を示す。同一条件で2体の試験体の実験を行っているが、差はほとんどないため、1体ずつの実験結果を示す。図中の水平線は鉄骨断面積を除いたコンクリート断面の計算圧縮耐力を示したもので、コンクリートシリンダー圧縮強度を用いて算定している。コンクリートの軸圧縮耐力及び各試験体の最大耐力を表-4に示す。

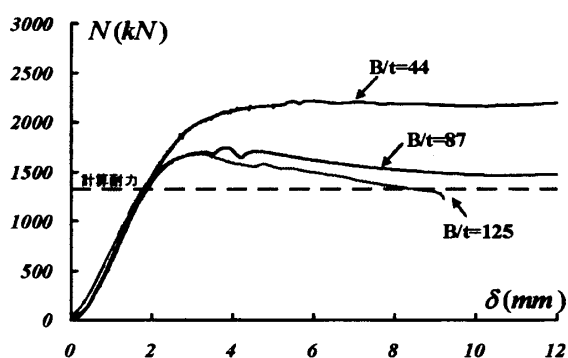
ただし、十字鉄骨を内蔵した試験体の最大耐力においては、軸方向変形が10mmを超えても最大耐力に達していないため、内蔵鉄骨が軸力を負担しない条件を満たすために、軸方向変形が6mmのときの耐力を最大耐力とした。図-4は鋼管の

(a) 幅厚比 44 ($t=4.5$)(b) 幅厚比 87 ($t=2.3$)(c) 幅厚比 125 ($t=1.6$)図-4 鉛直荷重 N -材長方向縮み δ 関係

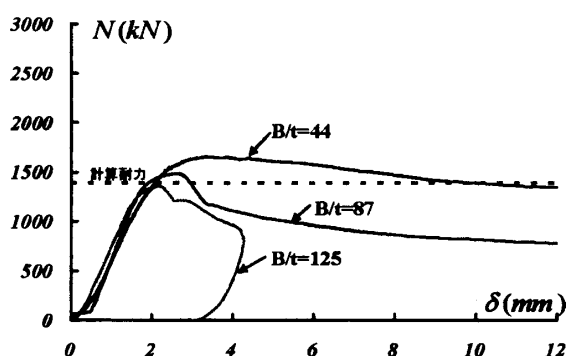
幅厚比ごとに荷重変形関係を示しているが、すべての幅厚比で、鉄骨を内蔵することにより、コンクリート圧縮耐力が大きくなっていること、単一H形鋼を配置するよりも十字鉄骨を配置すること



(a) 十字鉄骨



(b) 単一 H 形鋼



(c) 鉄骨なし

図-5 鉛直荷重 N -材長方向縮み δ 関係

で、さらに高い強度を発揮している。

図-5 は、内蔵鉄骨の形状ごとに荷重変形関係を示している。内蔵鉄骨にひずみゲージを貼付していないために鉄骨の負担軸力を算定できないが、鉄骨上面にスチレンボードを配していることと、鉄骨とコンクリート間の付着強度が小さいことを考えると、内蔵鉄骨に大きな軸力は流れていないものと考えられる。横補強鋼管の幅厚比 87 と 125 の試験体と比較すると、内蔵鉄骨がない場合には最大耐力発揮点以後の耐力低下において、

表-4 最大耐力と計算耐力

	横補強鋼管 幅厚比	十字鉄骨	単一 H	鉄骨なし
$ex N_u (kN)$	125	2107	1684	1360
$cal N_c (kN)$		1258	1326	1395
$ex N_u (kN)$	87	2200	1742	1486
$cal N_c (kN)$		1258	1326	1395
$ex N_u (kN)$	44	2697	2215	1628
$cal N_c (kN)$		1258	1326	1395



(a) 十字鉄骨



(b) 単一 H 形鋼

写真-1 実験終了時の内蔵鉄骨の状況

幅厚比 87 の試験体の方が少なくなっている (図-5(c) 参照)。しかし、内蔵鉄骨を挿入した場合、鉄骨による拘束効果が期待でき、幅厚比 87, 125 の両試験体ともに安定した挙動を示している (図-5(a), (b) 参照)。

今回の実験に用いた条件の範囲内ではあるが、実験結果より、以下のことが明らかとなった。

横補強鋼管の幅厚比が 125 の場合には内蔵鉄骨が無い場合でも脆性的な破壊を起こすことはないが、耐力の上昇はほとんどない。しかし、鉄骨を内蔵することによりコンクリートの圧縮性状が改善されている。大変形に至るまでコンクリートの計算耐力を上回っていることを考えると内蔵鉄骨を挿入することにより幅厚比 125 の横補強鋼管を用いてもコンクリートを十分横拘束できる。横補強鋼管の幅厚比が 44 の場合には内蔵鉄骨が無くても鋼管のみで十分な拘束効果が期待できる。

写真-1 に実験後、鋼管を剥がした状態でのコンクリートおよび鉄骨の状態を示しているが、十字鉄骨を内蔵した場合には鉄骨フランジで囲まれた八角形のコンクリートが拘束されており、単一 H 形鋼を内蔵させた場合にはフランジで挟まれた長方形のコンクリートが拘束されている状態であることがわかる。また、鉄骨フランジが製作時に比べ、外側へ反っていることからコンクリートを

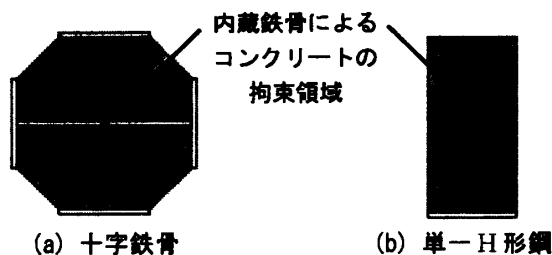


図-6 内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束領域

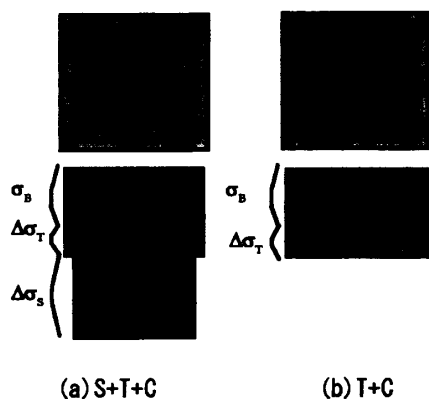


図-7 断面の応力分布

かなり有効に拘束している状況が見て取れる。

4. 拘束コンクリートの強度上昇率

写真-1に示した破壊状態を参考に、内蔵鉄骨で拘束されたコンクリートの領域を図-6に示す部分と考え、以下の仮定に基づいて、簡単な解析モデルを用いて、鉄骨及び鋼管により拘束されたコンクリートの強度上昇率を検討する。

仮定

- 1) 内蔵鉄骨によって拘束されるコンクリートの領域を図-6に示す領域と仮定する。
- 2) 内蔵鉄骨で拘束された領域のコンクリートの圧縮強度 $\Delta\sigma_s$ (N/mm²)とその外側でかつ鋼管に囲まれた領域のコンクリートの圧縮強度 $\Delta\sigma_T$ (N/mm²)はそれぞれの領域で一様に分布すると仮定する。また、この圧縮強度 $\Delta\sigma_T$ は、内蔵鉄骨がない試験体の鋼管により拘束されたコンクリートに一様に働く圧縮強度に等しいと仮定する。
- 3) 試験体の最大耐力 αN_u は、各領域での圧縮強度が同時に発揮でき、それらによる断面の抵抗力の和になると仮定する。

- 4) コンクリートのスケール効果は無視し、無拘束のコンクリートの圧縮強度はコンクリートシリンダー圧縮強度 σ_B に等しいと仮定する。
- 5) 鉄骨とコンクリート間の付着強度は零とする。

以上の5つの仮定に従えば、横補強鋼管のみの試験体の最大耐力より、鋼管により拘束された部分のコンクリートの圧縮強度の上昇分 $\Delta\sigma_T$ (N/mm²)は次式で求められる。

$$\Delta\sigma_T = \frac{\alpha N_u - \sigma_B \cdot A_{c1}}{A_{c1}} \quad \dots (1)$$

ここで、 A_{c1} :内蔵鉄骨なしの試験体のコンクリート断面積(mm²)、 αN_u :内蔵鉄骨なしの試験体の最大耐力(N)、 σ_B :シリンダー圧縮強度(N/mm²)である。

内蔵鉄骨により拘束されたコンクリートの圧縮強度の上昇分 $\Delta\sigma_s$ (N/mm²)は、2)の仮定より $\Delta\sigma_T$ を用いて、下式で求められる。

$$\Delta\sigma_s = \frac{\alpha N_u - \sigma_B \cdot (A_{c2} + A_{c3}) - \Delta\sigma_T \cdot A_{c3}}{A_{c2}} - \Delta\sigma_T \quad \dots (2)$$

ただし、 αN_u :鉄骨を内蔵した試験体の最大耐力(N)、 A_{c2} :内蔵鉄骨により拘束された領域のコンクリート断面積(mm²)、 A_{c3} :内蔵鉄骨で拘束された領域を除くコンクリート断面積(mm²)である。

上式より求めた鋼管により拘束された部分のコンクリートの圧縮応力度の上昇分 $\Delta\sigma_T$ から、鋼管で拘束された部分のコンクリートの圧縮応力度 ${}_T\sigma_T$ (N/mm²)は下式で計算できる。

$${}_T\sigma_T = \sigma_B + \Delta\sigma_T \quad \dots (3)$$

さらに、内蔵鉄骨により拘束されたコンクリートの圧縮応力度の上昇分 $\Delta\sigma_s$ を付加すれば、内蔵鉄骨で拘束された部分のコンクリートの圧縮応力

表-5 強度上昇率

	幅厚比44	幅厚比87	幅厚比125
十字鉄骨	2.15	1.75	1.68
単一H形鋼	1.67	1.32	1.27
鉄骨なし	1.17	1.07	1.02

度 σ_{ST} (N/mm²)は次式で算定できる。

$${}_T\sigma_{ST} = \sigma_B + \Delta\sigma_T + \Delta\sigma_S \quad \cdots (4)$$

表-5に十字鉄骨および単一H形鋼によって拘束された部分のコンクリート圧縮強度の上昇率 ${}_T\sigma_{ST}/\sigma_B$ の算定結果を示す。計算した結果より、鋼管による拘束効果よりも内蔵鉄骨で拘束された部分の拘束効果が明らかに大きいことがわかる。横補強鋼管の幅厚比が大きくなるにつれて、鋼管による強度上昇は低下するが、十字鉄骨を配置することで、大きな強度上昇が期待できることがわかる。

5. 結論

鋼管で横補強された鉄骨コンクリート断面の中心圧縮試験を行い、内蔵鉄骨および横補強鋼管によって拘束されたコンクリートの圧縮強度上昇率について、本実験の条件内で検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) 幅厚比125の鋼管で横補強した場合でも内蔵鉄骨を挿入することにより、コンクリートは鉄骨により拘束されるため、高い拘束効果が期待できる。
- 2) 幅厚比125の鋼管で横補強した場合でも、十字鉄骨を内蔵した場合、鉄骨により拘束された部分のコンクリートの圧縮強度はコンクリートシリンダー圧縮強度の1.5倍程度期待できる。
- 3) 単一H形鋼を内蔵させた場合に比べ、十字鉄骨を内蔵した方がコンクリートの高い拘束効果が期待できる。
- 4) 鋼管の幅厚比が125と大きな場合においては、内蔵鉄骨がなければ強度上昇は見られないが靱性は改善される。

本解析では内蔵鉄骨と鋼管の間に挟まれたコンクリートの拘束効果を鋼管のみによる拘束効果分に等しいとして解析しているが、この部分の拘束効果についてはさらに検討する必要があると考えられる。また、内蔵鉄骨による拘束効果には内蔵鉄骨の幅厚比の影響についても検討する必要がある。さらに拘束されたコンクリートの構成則も含めて、これらの定量的な評価法について今後検討していく予定である。

謝辞

本実験は、平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（C）、研究代表者：堺 純一）および日本鉄鋼連盟「2005年度鋼構造研究・育成助成事業」（先導研究助成、研究代表者：南 宏一）の援助を受けた。試験体製作及び載荷実験にあたり、九州共立大学工学部建築学科技師の高田一俊、永岡忠光の両氏および研究室の卒論生に御世話になった。ここに記して、関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 河本裕行・堺 純一：横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の弾塑性変形性状に関する研究日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）pp.1053-1054,2005.9.
- 2) 松原佳毅, 堺 純一, 河本裕行：横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の弾塑性変形性状に関する研究（その2,3,4）日本建築学会大会講演梗概集（関東）, pp.1157-1162,2006.9
- 3) 孫 玉平・崎野健治：EARTHQUAKE-RESISTING PERFORMANCE OF R/C COLUMNS CONFINED BY SQUARE STEEL TUBES 日本建築学会構造系論文集, PP.93-101,1997.11
- 4) 足立智宏, 倉本 洋, 川崎清彦：繊維補強コンクリートを用いた鉄骨コンクリート合成柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第24巻, 第2号, 2002.6, pp.271-276
- 5) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2001年