

論文 RC 柱の耐力とじん性に対する薄肉スパイラル鋼管の補強効果

福原 実苗^{*1}・和田 勉^{*2}・佐藤 立美^{*3}・南 宏一^{*4}

主旨：高圧縮力と高せん断力を受ける RC 柱の耐力とじん性の改善のために、薄肉スパイラル鋼管を柱内法高さのみに配置し、せん断破壊にともなう鉛直荷重の支持能力の喪失防止を図ることが可能であることを 6 体の試験体にもとづく実験によって確認した。すなわち、薄肉スパイラル鋼管で補強した RC 柱の力学的性状は、充填被覆円形鋼管コンクリート柱の性状に類似し、高圧縮力のもとでの繰り返し載荷にともなう柱材の材軸方向の圧縮ひずみの蓄積は生じにくく、このことが鉛直荷重の支持能力の確保に有効に働きを示すことを明らかにした。

キーワード：薄肉スパイラル鋼管，鉄筋コンクリート柱，せん断破壊，蓄積圧縮ひずみ

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、相当数の RC 造建物に倒壊を含む大被害が生じた。その中でも、中低層ピロティー形式の RC 造建物の 1 階部分の圧壊が多数みられた。そこで、このような崩壊を防ぐには、高圧縮力と高せん断力を受ける柱の耐力とじん性の確保が重要である。

高圧縮力と高せん断力を受ける RC 柱の耐力とじん性の改善のために、薄肉スパイラル鋼管によって拘束し、せん断破壊にともなう鉛直荷重に対する支持能力喪失を防止する試みが著者らによって、1983 年よりなされ、その拘束効果を報告してきた¹⁾。また、その研究成果にもとづいて兵庫県南部地震で大きな被害を生じた芦屋市に建設された 5 階建ての RC 集合住宅の 1 階柱に写真-1 に示すように薄肉スパイラル鋼管を内蔵させて施工を行った例がある。この建物は、ほとんど被害を受けていなかった事を事例にして、改めて、この薄肉スパイラル鋼管の補強効果を再認識することとなった。

そこで本論では、高圧縮力と高せん断力を受

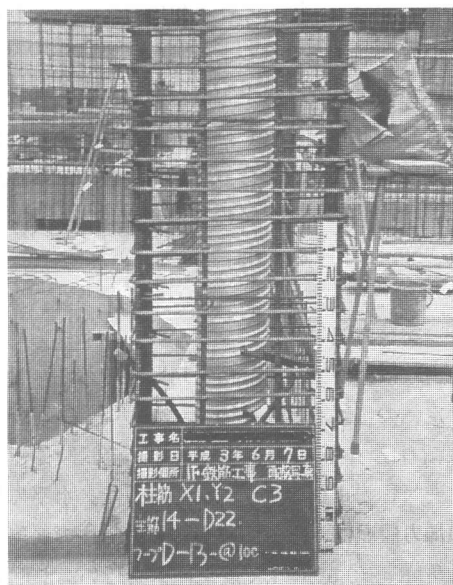


写真-1 薄肉スパイラル鋼管使用例

ける RC 柱の耐力とじん性の改善に対して、この薄肉スパイラル鋼管がどのような有効性をもつものであるのか、実験的に検討するものである。

*1 和田建築技術研究所 (正会員)

*2 和田建築技術研究所 所長 (正会員)

*3 広島工業大学教授 工学部建設工学 工博 (正会員)

*4 福山大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

2. 実験計画

試験体の形状寸法および断面寸法の一例を図-1に示す。試験体は形状、配筋、材料は同一とし、この薄肉スパイラル鋼管の有する力学的特性を検討するために変動因子は軸力比を2種類、薄肉スパイラル鋼管の挿入方法を2種類とした。実験計画を表-1に示す。薄肉スパイラル鋼管を柱内法にのみ挿入したタイプをWA、柱定着部まで挿入したタイプをWB、普通RC柱をRCとする。試験体のせん断補強筋は、2-D16@50 ($p_w=0.42\%$)、主筋 16-D13とし、薄肉スパイラル鋼管は直径 150mm、厚さ 0.4mm (管径比 $D_{Si}=0.50$) とした。使用材料の機械的性質を表-2に示す。主筋およびせん断補強筋には SD295A を使用した。コンクリートは普通ポルトランドセメントを用い、全試験体ともコンクリート打設は縦打ちとした。コンクリート打設後、1週間で脱枠し、実験時まで実験室内で養生を行った。試験体の材令はほぼ1ヶ月であり、圧縮強度は材令4週間で 29.8N/mm^2 であった。

3. 実験方法

実験は建研式加力装置を用いて行った。軸力は定軸力(試験体名中の3は軸力比 $n=0.3$ 、6は軸力比 $n=0.6$ を表す)とし、全試験体ともに逆対称の正負の水平載荷を行った。水平方向の加力履歴は、正負両載荷において柱の変位部材角 $R=\pm 0.5\%$ rad.で変位制御を行い、2回繰り返した後 $\pm 0.5\%$ rad.づつ増幅させ、その都度2回繰り返した。最終ループは処女載荷サイクルの段階で正負ともに最大耐力の75%まで低下し、その載荷ループを完了した段階で実験を終了とした。

4. 破壊過程

各試験体の実験結果の一覧を、表-3に示す。なお、同表に示される荷重の値は、作用軸力による転倒モーメントを考慮したものである。また、軸力比 $n=0.6$ における試験体 (RC6、WA6)

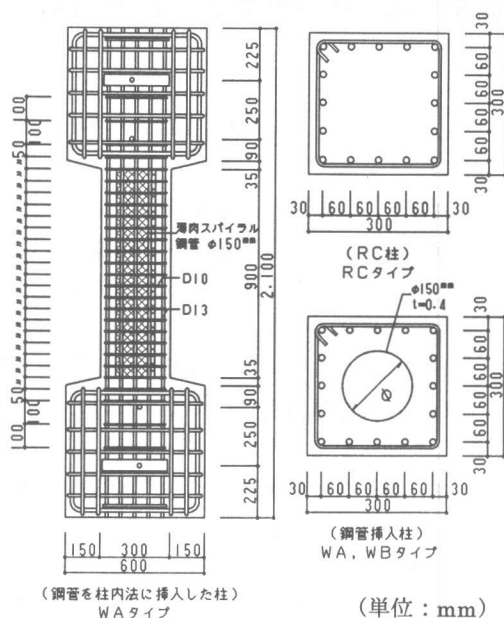


図-1 試験体の形状寸法および形状
(試験体: WA3, WA6)

表-1 実験計画

試験体名	鋼管挿入位置	鋼管径 (mm)	鋼管長さ (mm)	軸力比 (n) $N/b \cdot D \cdot F_c$
RC3				0.3
RC6				0.6
WA3	柱内法高さ	150	900	0.3
WA6				0.6
WB3	柱定着部	150	2,080	0.3
WB6				0.6

表-2 使用鉄筋および鋼管の機械的性質

	種類	降伏点 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び率 (%)
主筋D13	SD 295A	347	492	22.4
帯筋D6	SD 295A	399	542	10.1
鋼管 厚さ $t=0.4$		299	382	20.5

の最終ひび割れ状況を図-2(a)~(b)に示す。同図において実線は正荷重時に、破線は負荷重時に発生したひび割れ、黒塗り部分はコンクリート剥離を、斜線部分はコンクリート圧壊を表している。

試験体 RC3、RC6 は早期に中央斜めひび割れ、端部斜めひび割れが発生した後、中央斜めひび割れが発生した。また、高軸力ほどひび割

表-3 実験結果一覧 (単位 N:kN, Q:kN, R:%rad.)

試験体名	作用軸力 N	曲げひび割れ		端部斜めひび割れ		中央斜めひび割れ		最大耐力		破壊形式
		正 Q_F (R_F)	負 $-Q_F$ ($-R_F$)	正 Q_{DE} (R_{DE})	負 $-Q_{DE}$ ($-R_{DE}$)	正 Q_D (R_D)	負 $-Q_D$ ($-R_D$)	正 Q_{max} (R_{max})	負 $-Q_{max}$ ($-R_{max}$)	
RC3	773	100.9 (0.07)	-237.2 (-0.21)	149.9 (0.20)	-350.8 (-0.50)	216.6 (0.33)	-357.7 (-0.62)	340.1 (1.00)	-384.2 (-0.98)	SB1
RC6	1547	305.8 (0.30)	-401.8 (-0.50)	382.2 (0.50)	-402.8 (-0.50)	324.4 (0.34)	-280.3 (-0.34)	382.2 (0.50)	-401.8 (-0.50)	SB1
WA3	773	182.3 (0.16)	-219.5 (-0.29)	281.3 (0.50)	-275.4 (-0.51)	219.5 (0.25)	-199.9 (-0.24)	303.8 (0.80)	-275.4 (-0.51)	SB2
WA6	1547	301.8 (0.34)	-304.8 (-0.50)	314.6 (1.00)	-267.5 (-1.00)	294.1 (0.34)	-180.3 (-0.14)	319.5 (0.50)	-304.8 (-0.51)	SB2
WB3	773	85.3 (0.07)	-138.2 (-0.12)	208.8 (0.28)	-24.0 (-0.36)	23.4 (0.39)	-17.8 (-0.18)	29.2 (0.99)	-27.3 (-0.50)	SB2
WB6	1547	312.6 (0.40)	-282.2 (-0.41)	329.3 (0.50)	-280.3 (-0.77)	312.6 (0.40)	-200.9 (-0.20)	319.5 (0.50)	-297.9 (-0.50)	SB2

※破壊形式 SB1:主筋に沿うひび割れをともなうせん断付着割裂破壊

SB2:中空RC断面中央部に沿うひび割れをともなうせん断付着破壊

ひび割れの発生時の荷重は高かった。

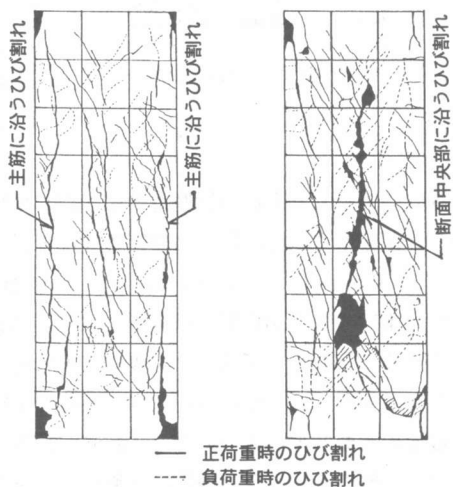
一方、試験体 WA3、WA6 は、第一ループ ($R=0.5\%$ rad.) までに、中央斜めひび割れ、初期曲げひび割れが発生し、柱中央部にひび割れを発生し、圧壊、剥離した。

また、試験体 WB3、WB6 は第一ループ ($R=0.5\%$ rad.) までに、初期曲げひび割れ、中央斜めひび割れの順に発生し、端部斜めひび割れが発生した後に最大強度とり、その後主鉄筋に沿って付着ひび割れが発生した。また、WA タイプと同様に中央部にひび割れが集中したが、WA タイプよりもひび割れ幅が大きく、圧壊が多くみられた。

軸力比が $n=0.6$ の試験体は、 $n=0.3$ の試験と比較してひび割れの生じる角度は鋭角であり、WA タイプ、WB タイプ共に、円形鋼管を内蔵する被覆鋼管コンクリート柱と同様のせん断付着破壊のモードが卓越し²⁾、柱中央部の圧壊および剥離が多くみられた。

5. 履歴曲線

全試験体の履歴曲線を図-3(a)~(f) に示す。縦軸は作用せん断力 Q を、横軸には変位部材角 R を示す。試験体 WA、WB タイプでは、薄肉スパイラル鋼管の挿入方法のいかに関わらず、せん断破壊を生じる通常の充填被覆形円



(a)RC6 (b)WA6

図-2 最終破壊ひび割れ状況

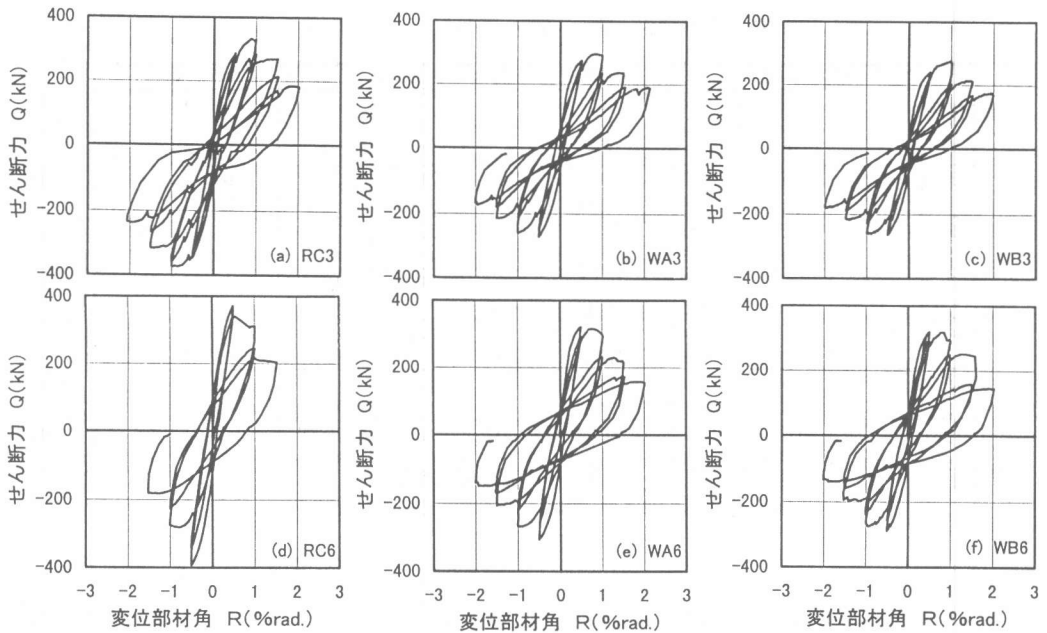


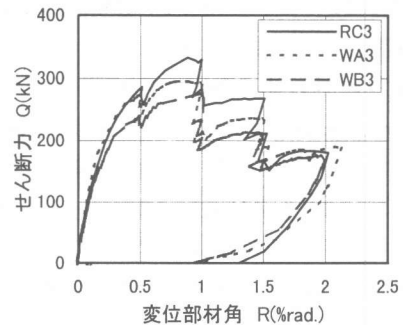
図-3 履歴曲線

形鋼管コンクリート柱の履歴特性に類似していることが観察される。最大強度時の変位部材角 R は、 $(0.50 \sim 1.00) \% \text{rad.}$ であり、その変位部材角までの履歴過程では保有強度は変位部材角の増加にともなって減少し、履歴曲線も逆 S 字型を示すが、変位部材角が大きくなると平行四辺形の履歴曲線に近づいていく傾向がある。

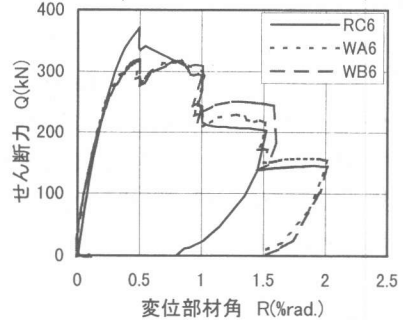
また、薄肉スパイラル鋼管の有無により履歴曲線を比較すると、作用軸力の大きさに関わらず、薄肉スパイラル鋼管を挿入した試験体は、最大耐力および初期剛性は小さいが、最大耐力後の耐力低下の度合いが低いことがわかる。なお、薄肉スパイラル鋼管の挿入方法の違いによる履歴曲線の違いは認められなかった。

6. 包絡線

図-4 に、各試験体の各履歴振幅の正荷重時における第一サイクルに対する包絡線を示す。作用軸力による影響を見ると、試験体 RC においては、軸力が高くなると初期剛性が高くなり、最大耐力低下の度合いが大きい。試験体 WA では、軸力による影響はさほど見られないが、



(a) $n=0.3$ シリーズ



(b) $n=0.6$ シリーズ

図-4 正荷重時の第一サイクルにおける包絡線

軸力が高くなると初期剛性は高くなり、最大耐力低下の度合いが大きくなる。また、残留変形も大きい。それに対し、試験体 WB では、試

験体 RC と同様に軸力が高くなると初期剛性が高くなり、最大耐力以降の耐力の低下の度合いが大きい。また、残留変形も大きい。

一方、薄肉スパイラル鋼管の挿入方法の違いの影響をみると、軸力比 $n=0.3$ の場合には、試験体 WA、WB は、試験体 RC よりも最大耐力および初期剛性は低いが、最大耐力以降の耐力低下の度合いが低いことがわかる。それに対して軸力比 $n=0.6$ の場合には、試験体 WA、WB では、包絡線に差がみられない。また、軸力比 $n=0.3$ と同様に、試験体 RC より最大耐力および初期剛性は低いものの、最大耐力以後の耐力低下の度合いは低いことがわかる。

7. 柱材の圧縮ひずみの推移状況

軸力比 $n=0.6$ の RC6 および WA6 の試験体の圧縮ひずみの推移状況を図-5、6 に示す。図-5、6 ではせん断力 Q と軸方向圧縮ひずみ ε 、軸方向圧縮ひずみ ε と変形部材角 R の関係を示している。柱材の軸方向圧縮ひずみ ε と繰返し回数 K の関係を図-7 に示す。縦軸は柱材軸方向の圧縮ひずみ ε を、横軸は繰返し回数 K を示す。

まず、薄肉スパイラル鋼管の挿入方法による違いによる影響をみる。試験体 RC は、軸力比 $n=0.3$ では圧縮ひずみはほぼ比例的に増加するが、軸力比 $n=0.6$ の場合には始めは圧縮ひずみは小さいが $K=2$ を超えると急激に圧縮ひずみは増大する。試験体 WB は、試験体 RC と似ているが、軸力比 $n=0.3$ では圧縮ひずみが減少し、軸力比 $n=0.6$ は始めは圧縮ひずみの値は小さいが $K=6$ を超えると急激にその値は増加する。薄肉スパイラル鋼管を挿入した試験体は繰返しの増加に対し、RC 柱より急激な変化が生じるのが遅く、圧縮ひずみは小さい。

一方、軸力比の影響をみると、軸力比 $n=0.3$ では、RC3、WA3、WB3 とともに初期の圧縮ひずみの値は小さく $K=2$ 以降の圧縮ひずみが大きくなっている。しかし、試験体 WB3 は、 $K=2$ では試験体 RC3 と圧縮ひずみは変わらず、次

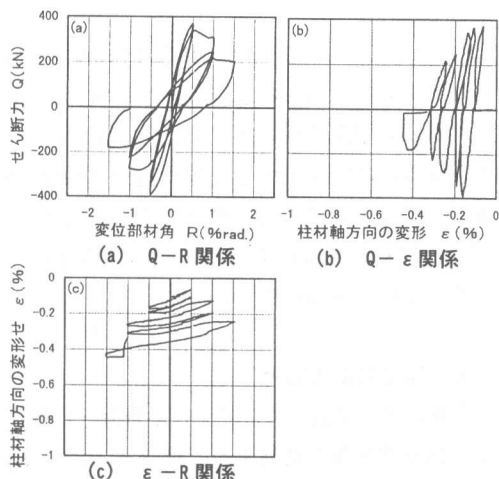


図-5 RC6：柱材の軸方向圧縮ひずみの推移

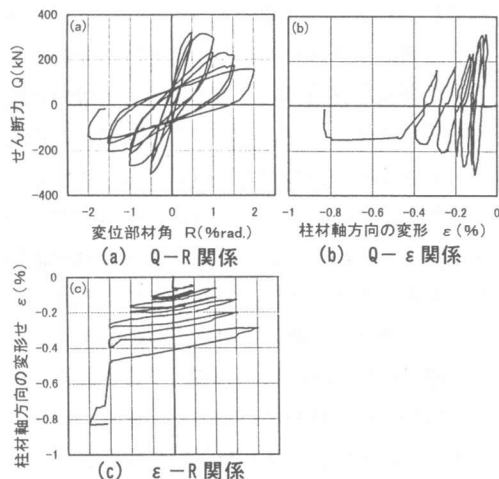


図-6 WA6：柱材の軸方向圧縮ひずみの推移

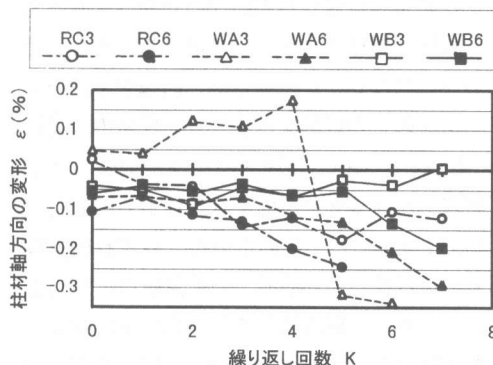


図-7 柱材軸方向の変形—繰返し回数

第に圧縮ひずみが小さくなっている事がわかる。さらに、繰返しの回数を重ねていくと変形量が減少している。それに対し、軸力比 $n=0.6$

では、RC6, WA6, WB6 初期段階では、圧縮ひずみの増加はみられないが、ある K の値以上になると急激に圧縮ひずみの値が増大する。試験体 RC6 は $K=2$ から急激に圧縮ひずみが増大しているのに対して、試験体 WA6 は $K=3$ まで、試験体 WB6 は $K=5$ まで急激な圧縮ひずみの蓄積は認められなかった。

8. 実験結果の検討

実験によって得られた最大せん断力と計算値との比較を検討した結果を、図-8 に示す。縦軸には作用軸力 N を横軸には作用せん断力 Q をそれぞれ示し、図中のシンボルマークは各試験体の実験値を表している。実線は、曲げ破壊の限界断面が材端部にあると仮定して求めた終局曲げ耐力を示している。断面の終局曲げ耐力は、日本建築学会の SRC 規準にもとづいて、一般化累加強度式によって求めている³⁾が、薄肉スパイラル鋼管によるコンクリートの拘束効果の影響は小さいので、この計算では考慮していない。また、点線は作用圧縮力の効果によって、柱材の終局曲げ耐力が増大することを考慮して求めた補正終局曲げ耐力を示す⁴⁾。一方、破線は RC 柱の終局せん断耐力を修正 B 法⁴⁾によって求めたものであり、二点鎖線は薄肉スパイラル鋼管を内蔵した RC 柱の終局せん断耐力を RC 柱と同様に修正 B 法によって求めたものである。ただし、この場合は、内蔵する薄肉スパイラル鋼管の影響を考慮して、柱材の有効幅 b_e を A_e/D (A_e : 薄肉スパイラル鋼管によって囲まれた面積を全断面より差し引いた面積、 D : 柱せい) として求めている。いずれの実験値も、ほぼ終局せん断耐力の計算値に近い値を示しているが、薄肉スパイラル鋼管を内蔵している試験体は、軸力比のいかんに関わらず RC 柱よりも小さい値を示し、その耐力の低下の度合いは計算されたそれぞれのせん断耐力の差違にほぼ等しくなっている事が示された。

9. 結び

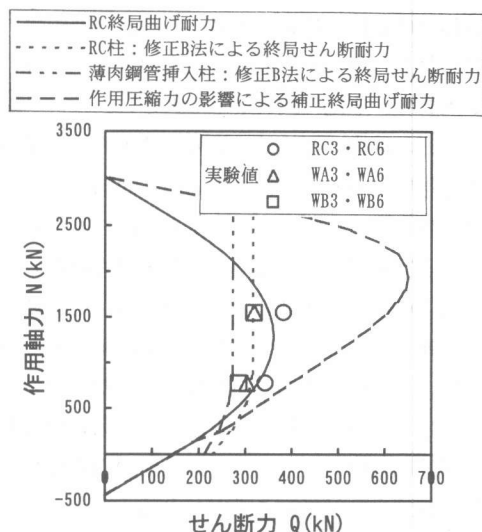


図-8 せん断力-作用軸力の相関関係

高圧縮力と高せん断力を受ける薄肉スパイラル鋼管で、コアコンクリートを補強した RC 柱の破壊性状および履歴特性は、充填被覆形円形鋼管コンクリート柱の性状に類似し、高圧縮力のもとでの繰返し载荷にともなう柱材軸方向圧縮ひずみの蓄積は生じにくい。そのために、せん断破壊にともなう柱材の鉛直荷重の支持能力の喪失の防止に対して、この薄肉スパイラル鋼管は有効であることが示された。また、その薄肉スパイラル鋼管は、柱材の内法にのみ配置することで、柱材の鉛直荷重の支持能力を確保できることが示された。

参考文献

- 1) 佐藤立美・和田勉・松井源吾・飯田良一・長縄裕行・井崎征男: 中空管埋設 RC 柱の耐力とじん性に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.2121~2122, 1983.9
- 2) 佐々木良一・南宏一・若林実: 被覆鋼管コンクリート柱のせん断強度, コンクリート工学年次論文報告集, pp.535~540, 1988.10
- 3) 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, pp.29~32, 1987.6
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, pp.94~96, 1997.7