

[2096] 被覆形鋼管コンクリート柱のせん断強度

正会員 ○佐々木良一（摂南大学工学部）
 正会員 南 宏一（大阪工業大学工学部）
 正会員 若林 實（日本建築総合試験所）

1. 序

鋼管コンクリート柱の断面構成としては、充てん被覆形、被覆形および充てん形の3種類があり、これらの構造形式は、鋼管主材の内側あるいは外側をコンクリートおよび鉄筋コンクリートで補強することによって、鋼管部材の力学的性状を改善することを意図したものである。

充てん形柱のせん断抵抗についての研究は近年多く行なわれているが、被覆形柱のせん断抵抗に関する研究については殆ど皆無に近い状態である。そこで、この被覆形柱について一定軸力と繰り返し曲げせん断力を受けたときのせん断抵抗に関する力学的性状を把握するために、一連の実験変数をもつ被覆形、中空形（鋼管を除外しその部分を中空とした被覆部分のみの純鉄筋コンクリートの断面構成）および純钢管を含む135体の試験体を用いて、そのせん断破壊性状について実験的研究を行った。[3～11] 本論文は、この実験研究の研究成果のうち終局せん断強度について考察するもので、あわせて日本建築学会SRC基準[1]に示されているせん断強度式の妥当性について検討したものである。

2. 実験全般

本実験の実験因子は、(1)被覆鉄筋コンクリート部分のせん断補強筋の効果、(2)被覆鉄筋コンクリート部分の有効せん断面幅の影響、(3)せん断スパン比の影響、(4)軸力比の影響であり、これらに用いた試験体の断面構成を図-1に示す。鉄骨鉄筋コンクリートとしての被覆形、純鉄筋コンクリートとしての中空形と钢管独自の性状を知るための純钢管より構成しており、钢管および中

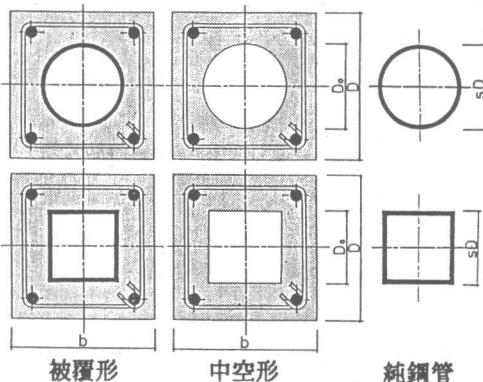


図-1 試験体の断面構成

表-1 実験系列

目的	断面形状	钢管	軸力比N/N ₀	実験変数	文献
せん断補強筋比	被覆形	円形	0, 0.2	$p_w = 0, 0.46, 0.70, 1.04, 1.51, 2.09 (\%)$	4
	被覆形	角形	0, 0.2	$p_w = 0, 0.38, 0.57, 0.94, 1.41, 2.07 (\%)$	5
	中空形	円形	0, 0.2	$p_w = 0.35, 0.48, 0.70, 0.89, 1.18, 1.77 (\%)$	9
	中空形	角形	0, 0.2	$p_w = 0.33, 0.44, 0.66, 0.82, 1.09, 1.63 (\%)$	10
有効せん断面幅	被覆形	円形	0, 0.2	$sD/D = 0.699, 0.677, 0.572, 0.509, 0.446, 0.324, 0.303$	5
	純钢管	円形	0.33	$sD/D = 0.699, 0.572, 0.446, 0.303$	8
		角形	0, 0.2	$sD/D = 0.625, 0.500, 0.400, 0.300$	
せん断スパン比	被覆形	円形	0.2	$h/D = 1, 2, 3, 4, 5, 6,$	4
軸力比	被覆形	円形	0, 0.2	$sD/D = 0.699, 0.572, 0.446, 0.303$	5
	中空形	円形	0.33	"	8
	純钢管	角形	0, 0.2	$sD/D = 0.625, 0.500, 0.400, 0.300$	11

N : 作用軸力 N₀ : 中心圧縮塑性強度

sD : 鋼管又は中空外径 D : 柱全外径 h : 柱高さ

空形として円形と角形を用いている。その実験系列を表-1に示すが、実験変数がせん断スパン比以外の全試験体のせん断スパン比は $h/D=3$ である。また、試験体の断面寸法として $b \times D = 150 \times 150\text{mm}$ と $200 \times 200\text{mm}$ の2種類用いている。コンクリートは、材令8~12週で圧縮強度は $200 \sim 280\text{kgf/cm}^2$ である。

3. 被覆鉄筋コンクリート部分の有効せん断面幅 b' .

図-2にひび割れの模式図を示す。実験結果より考慮すべきせん断面の位置としては、実験変数のいかんにかかわらず図の点線で示すように、円形に対しては鋼管および中空形の重心位置を、また、角形に対してはフランジ位置を対象とすればよいことが得られたので、この位置の被覆鉄筋コンクリート部分の幅を有効せん断面幅 b' とする。従って被覆形では $b' = b - sD$ 、中空形では $b' = b - D_0$ である。 $(b:柱全幅, sD:鋼管外径, D_0:中空外径)$

4. 鋼管コンクリート柱の終局せん断強度評価式

被覆鉄筋コンクリート部分のせん断破壊強度は、図-2の点線で示すせん断面に対するせん断付着強度によって決定されたものと仮定して、終局せん断強度を求める。

文献[2]に示された方法に準じて、被覆形の試験体のせん断付着強度は、

$$Q_a = s Q_{a0} + r Q_a \quad (1)$$

の累加強度式で与えられる。 $s Q_{a0}$ は純鋼管の終局せん断強度で

$$s Q_{a0} = \min(s Q_{m0}, s Q_{s0}) \quad (2)$$

と与えられ、 $s Q_{m0}$ は柱頭柱脚の全塑性曲げモーメントから決定される純鋼管のせん断力を、 $s Q_{s0}$ は純鋼管のせん断強度をそれぞれ表すが、本実験で採用された純鋼管に対してはすべて、 $s Q_{m0} < s Q_{s0}$ の条件を満足している。従って純鋼管の $s Q_{m0}$ は、通常の軸力の範囲では軸力は負荷されないと仮定して取り扱ってよいと思うので、(本実験結果より) 次式によってその強度を評価する。

$$\text{鋼管円形} \quad s Q_{m0} = 2st(sD-st)^2 s \sigma_y/h \quad (3)$$

$$\text{角形} \quad s Q_{m0} = 2 [st \cdot sD(sD-st) + \{(sD-2st)^2 st/2\}] s \sigma_y/h \quad (4)$$

$(st:鋼管板厚, sD:鋼管外径, s \sigma_y:鋼管の引張降伏応力度, h:柱高さ)$

さらに、 $r Q_a$ は、被覆鉄筋コンクリート部分のせん断付着強度を示し、円形鋼管および角形鋼管を用いた試験体に対し、有効せん断面幅 b' に対するせん断補強筋比を $p_w = a_w/b' \cdot x$ で表せば($a_w:1$ 組のせん断補強筋の断面積, $x:$ せん断補強筋の間隔>)

$$r Q_a = b' \cdot r j (\bar{\alpha} \cdot \alpha \cdot F_c + \beta \cdot p_w \cdot r_w \sigma_y) \quad (5)$$

によって与えられるものとする。 $(rj=0.75D, D:柱全せい, \bar{\alpha}:コンクリートの直接せん断応力度係数, \alpha:せん断スパン比による割増率, F_c:コンクリート強度, \beta:せん断補強筋比の摩擦係数, r_w \sigma_y:せん断補強筋の引張降伏応力度)$

ここで筆者らは、既往のせん断スパン比を固定した実験結果から、 $\bar{\alpha}=0.1$, $\alpha=1.0$, $\beta=1.0$ として、

$$r Q_a = b' \cdot r j (0.1F_c + p_w \cdot r_w \sigma_y) \quad (これをA式とする) \quad (6)$$

によって与えられることを示した。しかし、実験変数をせん断スパン比とした実験結果から、こ

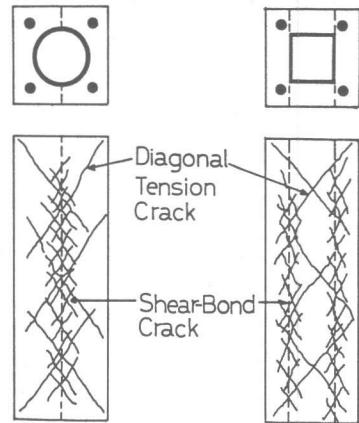


図-2 ひびわれの模式図

の影響の割増率 α を考慮する必要があった。そこで、1987年のSRC規準改定の第4版では、被覆鉄筋コンクリート部分のせん断強度評価式としてせん断スパン比の影響を考慮して、 $\bar{\alpha}=0.075$ 、 $\beta=0.5$ とした

$$rQ_a = b' \cdot r_j (0.075 \alpha \cdot F_c + 0.5 p_w \cdot r_w \sigma_y) \quad (これをB式とする) \quad (7)$$

が採用されている。ここに、 $\alpha = 4 / (\frac{M}{rQ \cdot r_d} + 1) \quad 1 \leq \alpha \leq 2$

以下B式を提案した根拠について、各実験変数別にその影響を考察することにする。

5. せん断強度と実験変数との関係

1) せん断補強筋比。図-3(a)に被覆形試験体のせん断強度とせん断補強筋比の関係を示す。縦軸は被覆鉄筋コンクリート部分のみの性状を知るために、被覆形の最大せん断強度から(3)(4)式で求められた sQ_{ma} を減じた rQ を、コンクリート強度 F_c で無次元化したものである。なお、 sQ_{ma} を使用したのは、このシリーズでは純鋼管の実験が行われなかつたためである。

図中のCal.A, Cal.Bは前述のA式およびB式で評価したものであり、 $p_w=1.2\%$ 以上はせん断強度は上昇しないものと仮定したものである。 $p_w=0.5\sim0.6\%$ まではA式に近い値をとる傾向にあるが、それ以上のせん断補強筋比となるとA式とB式の中間の値をとる傾向になり、その挙動も明確なものでない。そこで、この性状を更に明確にするために鋼管を除外し、被覆形に対応した中空の純鉄筋コンクリート部材に対して検討したのが図-3(b)である。この結果、中空形が円形、角形に共通して軸力比が零の試験体では $p_w=0.5\sim0.6\%$ まではA式で、それ以上の p_w となるとB式で強度が評価できることが示される。これに対し軸力比 $N/N_0=0.2$ の試験体ではすべてがA式で評価した結果に一致しているが、B式での評価がせん断強度の下限値を与えていることが示されている。

図-4は、実験値を計算値で除した値とせん断補強筋比との関係を示すもので、(a)はA式で、(b)はB式で計算したものである。この結果(a)ではその平均値が $m=1.01$ で実

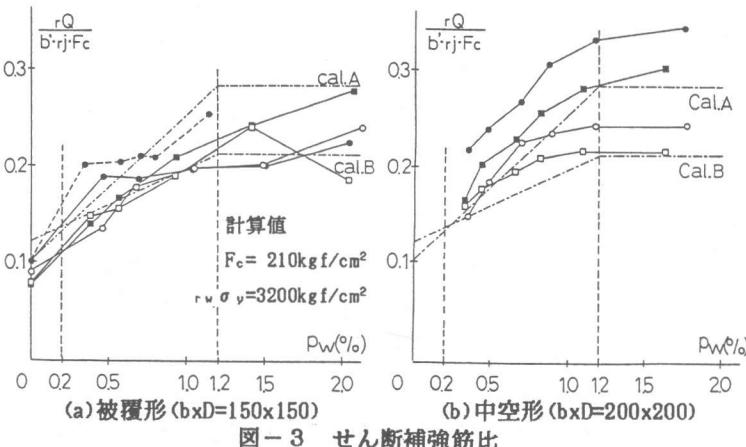


図-3 せん断補強筋比

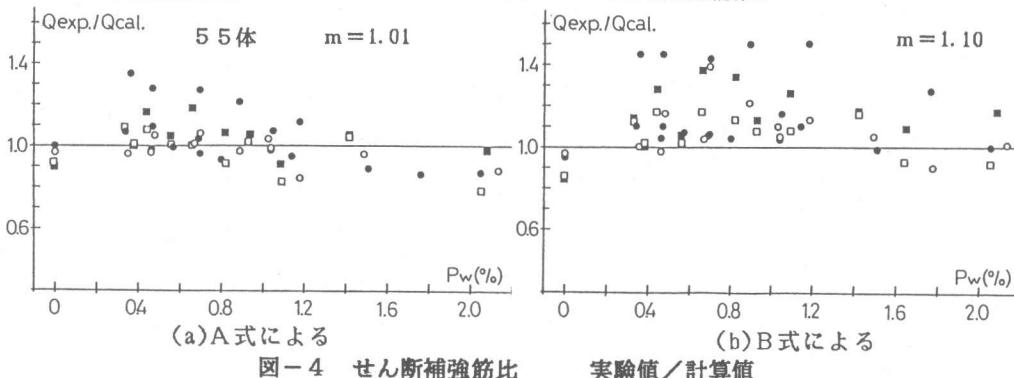


図-4 せん断補強筋比

実験値／計算値

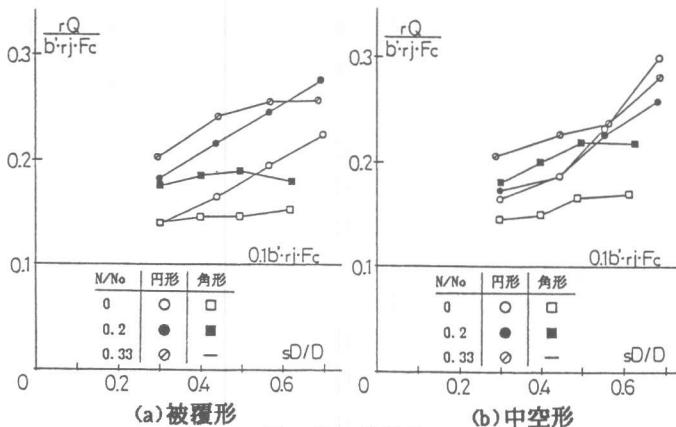


図-5 外径比

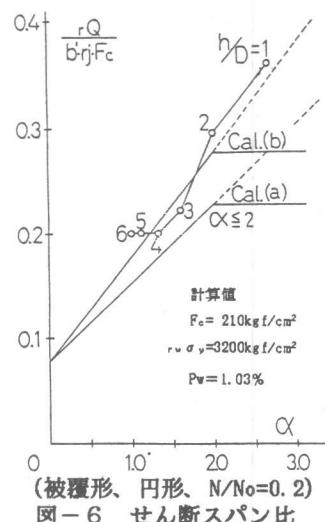


図-6せん断スパン比

験値に近い値を示し、(b)では $m=1.10$ で安全側となる値を示しておらず、従ってせん断補強筋比に関して

$$rQ_u = 0.5P_w \cdot r_w \sigma_y \cdot b' \cdot r_j + f_1 \quad (P_w \leq 1.2\%)$$

の関係がほぼ成立することが示され、 f_1 はせん断補強筋以外のせん断耐力に関する関数である。
2). 有効せん断面幅。被覆鉄筋コンクリート部分のせん断強度と外径比（被覆形 sD/D 、中空形 D_θ/D 、 $sD=D_\theta$ 、 $D=b$ 、 sD :鋼管外径、 D_θ :中空外径、 D :全せい、 b :全幅）を関数とする有効せん断面幅 b' の関係を図-5に示す。縦軸は、被覆形では最大せん断強度から、そのときの部材角振幅に対応した部材角振幅をもつ純钢管のせん断強度を減じたものを、中空形では最大せん断強度を rQ として、これをコンクリート強度で無次元化したものである。これによれば、角形ではほぼ一定の値を示しているが、円形では外径比が大きくなるに従いせん断強度が上昇する傾向を示している。これは、有効せん断面幅を $b'=b-sD$ として、せん断面積を $b' \cdot r_j$ とした長方形としているため円形の残存部分が有効に抵抗しているためである。従ってこれを安全側の誤差を与えるものとして、全体的にほぼ

$$rQ_u = 0.1F_c \cdot b' \cdot r_j + f_2 \quad (9)$$

の関係が成立する。 f_2 は被覆鉄筋コンクリート部分の最大せん断強度を規定する有効せん断面幅 b' およびコンクリート強度以外の要素の関数である。そしてB式によれば本試験体の場合、 $\alpha=1.6$ となるので、 $rQ_u = 0.12F_c \cdot b' \cdot r_j + f_2$ となり同様の結果となる。

3). せん断スパン比。被覆形試験体におけるせん断強度とせん断スパン比 h/D の関係を図-6に示す。縦軸は最大せん断強度から純钢管の計算値 Q_{m0} を減じた rQ をコンクリート強度で無次元化したもので、横軸は $\alpha=4/\left(\frac{M}{rQ \cdot d}+1\right)=4/\left(\frac{h}{2D}+1\right)$ を示す。これより $h/D=4$ 以上では曲げ破壊を呈しているので $h/D=1 \sim 4$ について検討する。

ここで被覆鉄筋コンクリート部分のせん断強度を(5)式で与えるものとする。このとき、 $\bar{\alpha}=0.075$ 、 $\beta=0.5$ としたのが図中のCal.(a)であり、 $\bar{\alpha}=0.1$ 、 $\beta=0.5$ としたのがCal.(b)である。これによればCal.(b)で評価すれば実験値によく一致する傾向にあり、Cal.(a)で評価すれば安全側を示す結果となっており、これらのことからせん断スパン比の影響を無視することができない結果を得た。そこで、 $\beta=0.5$ としたとき、 $\bar{\alpha}$ としては0.1の方がより実験値に近い傾向を示すが、被覆形钢管コンクリート構造の場合は、その安全性を少し高く評価する方がよいと思われる所以 $\bar{\alpha}=0.075$ とするのが適切であると判断する。従って、被覆鉄筋コンクリート部分の実用的せん断強度の評価式としてB式にその妥当性がみられる。

4). 軸力比。被覆形と中空形の外径比ごとの各試験体のせん断強度と軸力比の関係を図-7に示す。横軸は、作用軸力Nと中心圧縮塑性強度 N_0 との比を示す。各試験体とも、軸力比が零から0.2まではせん断強度は若干上昇しているが、0.33になると逆に若干減少していることが示され、せん断強度に対して作用軸力は影響しない結果となっている。従って、A, B式は作用軸力の影響を含まない形になっている。

6. コンクリートの直接せん断応力度係数

被覆形の場合、被覆鉄筋コンクリート部分のせん断強度、 Q_s は、最大せん断強度からそれに対応した鋼管部分のせん断強度を減じて求められるが、これには鋼管の要素が複雑に入っている。そこで、ここでは鋼管要素の全く入らない中空形の純鉄筋コンクリート試験体の最大せん断強度の実験値である、 Q_s に対してAおよびB式により、コンクリートの直接せん断応力度係数 $\bar{\alpha}_1$ および $\bar{\alpha}_2$ を求める。これは、それぞれ

$$A\text{式より } \bar{\alpha}_1 = r_Q / b^2 r_j F_c - p_{w/r} \delta_y / F_c \quad (10)$$

$$B\text{式より } \bar{\alpha}_2 = r_Q / \alpha b^2 r_j F_c - 0.5 p_{w/r} \delta_y / F_c \quad (11)$$

と求められる。図-8(a), (b)は、 $\bar{\alpha}_1$ と $\bar{\alpha}_2$ とコンクリート強度の関係を示している。この両者の相加平均を求めると $\bar{\alpha}_1$ で $m_1=0.124$, $\bar{\alpha}_2$ で $m_2=0.104$ となり、またそれぞれの下限値をとれば $\bar{\alpha}_{1,\min}=0.080$, $\bar{\alpha}_{2,\min}=0.072$ となる。従って、 $\bar{\alpha}$ として $\bar{\alpha}=0.075$ を用いたB式によって被覆鉄筋コンクリート部分のせん断強度を評価すればよいことがわかる。

7. 被覆形の終局せん断強度

被覆形、中空形、純鋼管の各20体、計60体の試験体による被覆形の終局せん断強度を、 $Q_s=s Q_{s0}+r Q_{s0}$ の(1)式による累加強度で評価する。純鋼管の $s Q_{s0}$ は(3), (4)式による $s Q_{s0}$ で求め、被覆鉄筋コンクリート部分の $r Q_{s0}$ はB式によって求めるものとする。その計算値と実験値を図-9に示す。○は被覆形の実験で測定された最大強度、●は中空形の最大強度にそれに対応した純鋼管の強度を累加したもので、また□は被覆形の計算値、■は中空形と純鋼管の各試験体の計算結果を累加したものである。これより、被覆形の終局せん断強度の実験値に対する計

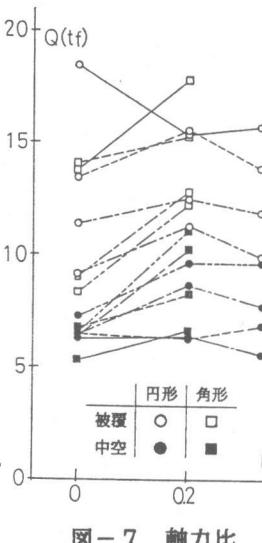


図-7 軸力比

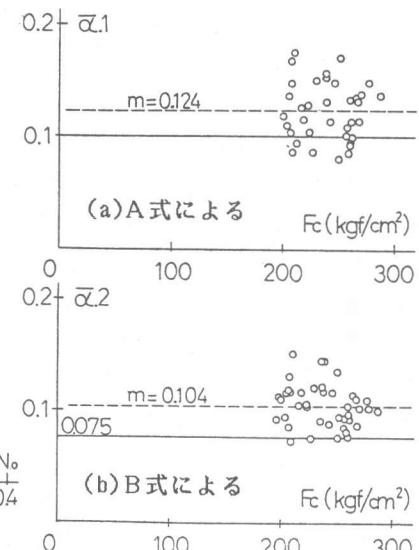


図-8 直接せん断応力度係数

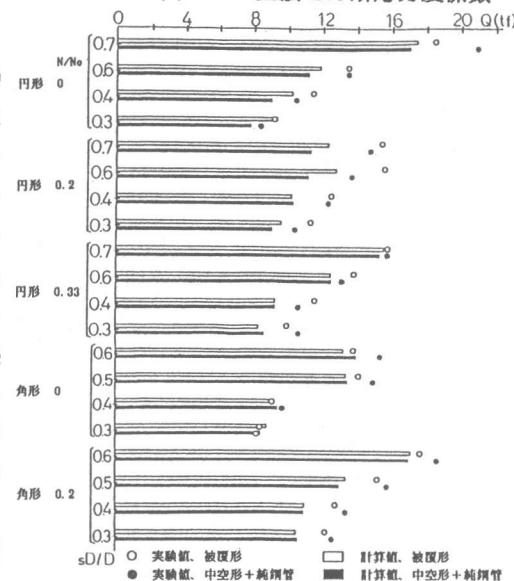


図-9 終局せん断強度

算値は0.96~1.26の安全率を、また中空形と純鋼管を累加した実験値に対する計算値は0.98~1.30の安全率を与えており、被覆形とほぼ同一の結果となっている。従って、(1)式は被覆形の終局せん断強度のほぼ下限値を与えることが示され、被覆鉄筋コンクリート部分と純鋼管のそれぞれの終局せん断強度の累加の適応性が認められる。

8. 全試験体の実験値と計算値の比較

被覆形と中空形の全試験体105体の実験値と、被覆鉄筋コンクリート部分をB式で計算した結果との対応を比較したのが図-10である。図中に点線で示してあるのは最小2乗法によって求めたものである。また、図-11は全試験体の安全率の頻度分布でB式で被覆鉄筋コンクリート部分を評価したものである。図中のmは相加平均、 \bar{O} は標準偏差を示している。これらの結果、被覆鉄筋コンクリート部分の終局せん断強度をB式で評価したものは、実験値より若干安全側になる傾向を示しており、被覆鉄筋コンクリート部分の終局せん断強度の実用的評価式としてその有用性が認められる。

9. 結語

被覆形鋼管コンクリート柱の終局せん断強度を求めるとき、被覆鉄筋コンクリート部分の評価が重要となる。本研究の結果、被覆鉄筋コンクリート部分を評価するとき、B式で評価すれば実用的に最も適合した妥当性のある結果を得た。そして、これが改定された日本建築学会鉄骨鉄筋コンクリート構造規準中の該当式である。また、純鋼管は(3),(4)式で評価し、被覆鉄筋コンクリート部分はB式で評価しその両者の累加で終局せん断強度を求められることが確認された。

【参考文献】

- 1) 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」第4版、1987年6月
- 2) 若林實、南宏一：「一定軸力と確定的な繰り返し曲げせん断力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する実験的研究」コンクリート工学、vol.13, No.3, 1975年3月
- 3) 若林實、南宏一、佐々木良一、小河弘明：「鋼管コンクリート柱のせん断強度に関する実験的研究」京都大学防災研究所年報21号 昭和53年4月
- 4) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その3」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和54年9月 p.p 1645~1646
- 5) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その4」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和55年9月 p.p 1903~1904
- 6) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その5」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和56年9月 p.p 2133~2134
- 7) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その6」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和58年9月 p.p 2491~2492
- 8) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その7」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和60年10月 p.p 1379~1380
- 9) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その8」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和61年8月 p.p 1425~1426
- 10) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その9」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和62年10月 p.p 1295~1296
- 11) 佐々木良一：「鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究、その10」日本建築学会大会 学術講演梗概集、昭和63年投稿中

