

論文 R C 円形断面柱の終局せん断耐力の算定式の提案

孫 玉平^{*1}・三宅良和^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断終局耐力を直接求めるための算定式を提案した。本提案算定式は，円形断面部材のせん断破壊面における力の釣り合い条件に基づいて誘導されており，円形断面を正方形または長方形断面に置換することなく，部材のせん断耐力を直接算定することができる。また，既往の円形断面部材のせん断耐力に関するデータを収集し，本提案式の精度について検証した結果，本算定式は鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断終局耐力を精度よく評価できることが明らかになった。

キーワード：円形断面部材，終局せん断耐力，Mohr-Coulomb 型破壊条件

1. はじめに

鉄筋コンクリート円形断面部材は土木・建築構造物によく用いられているものの，部材の終局曲げ耐力およびせん断耐力については，現行の設計指針または計算規準には直接計算するための設計式は提示されておらず，いずれも円形断面を正方形断面または長方形断面に置き換えてから，長方形断面用の曲げおよびせん断耐力式を準用するという間接算定法によって推定することになっている^{1,2)}。

平成 12 年の建築基準法の改正に伴い 鉄筋コンクリート構造の耐震設計は性能基盤型設計法に移行しつつあるなか，部材の性能設計を行う際に，部材の断面詳細，横補強筋比，主筋比，せん断スパン比などが部材の性能への直接的な影響を反映できる設計式は必要不可欠となる。既往の「断面置換法」による円形断面部材の終局耐力の間接設計法は，断面置換という近似手続きに伴う誤差が避けがたいほか，正方形断面と矩形断面のどちらに置換すべきかに関する明確な規定がないことに起因する計算結果の不確実性がしばしば指摘されていることから，必ずしも適切な設計法であるとはいえない。

円形断面部材の終局耐力を直接評価するための算定式を開発するために，著者らはこれまで

に，円形断面圧縮域におけるコンクリートの等価応力ブロックを開発したうえで，この等価応力ブロックに基づく終局曲げ耐力の算定法を提案してきた³⁾。さらに，著者らは文献 3 で提案した算定法をより実設計に適した簡便な設計式に進化させ，円形断面柱の終局 N - M 相関曲線式を提案してきた⁴⁾。

本論は，部材のせん断破壊面における力のつりあい条件と Mohr-Coulomb 型破壊則に基づき，円形断面柱の終局せん断耐力を直接評価するための設計式を提案することを目的としたものである。また，既往の円形断面部材の実験結果との比較と，従来の代表的な「断面置換法」による計算結果との比較により，本提案式の妥当性について検証した。

2. 既往の円形断面試験体の概要

提案する終局せん断耐力設計式における実験定数の同定に用いた試験体は，文献 5～19 に示す試験体である。計 109 体の試験体のなか，曲げ破壊が先行したものは 45 体で，せん断破壊した試験体は 72 体である。各試験体の破壊形式は，文献中に明確に記述されている場合はそれを引用し，記述されていない場合は履歴性状やひび割れ状況から著者らが判断した。試験体の実験

*1 九州大学大学院 人間環境学研究院 助教授 工博 (正会員)

*2 九州大学大学院 人間環境学府 都市共生デザイン専攻

表 - 1 既往の円形試験体の実験変数と変動幅

破壊形式	試験体数	a/D	f'_c (MPa)	η	p_w (%)	f_{yh} (MPa)	p_g (%)	f_{ys} (MPa)
曲げ(曲げ 降伏先行)	45	1.0	23.6	-0.15	0.08	276	1.43	339
		~	~	~	~	~	~	~
せん断	72	3.0	53.8	0.72	1.80	1420	3.38	803
		~	~	~	~	~	~	~
		0.8	22.4	0.0	0.0	314	1.90	339
		~	~	~	~	~	~	~
		2.5	54.9	0.60	1.80	1392	4.57	965

a/D = せん断スパン比,
 p_w = 横補強筋面積比,
 p_g = 主筋比,

f'_c = コンクリートのシリンダー強度,
 f_{yh} = 横補強筋の降伏点応力,
 f_{ys} = 主筋の降伏点応力

η = 軸力比,

変数の変動範囲は表 - 1 に記す。

終局せん断耐力算定式の提案に先立って、終局曲げ耐力設計式の概要と帯筋で拘束された RC 部材への適応性について述べる。

文献 4 によれば、円形断面柱の無次元化 N - M 相関曲線は式(1)により与えることができる。

$$m = \begin{cases} m_0 \left[1 - \left(\frac{n - n_0}{n_0 + r} \right)^2 \right], & n \leq n_0 \\ m_0 \left[1 - \left(\frac{n - n_0}{n_0 - (K + r)} \right)^2 \right], & n > n_0 \end{cases} \quad (1)$$

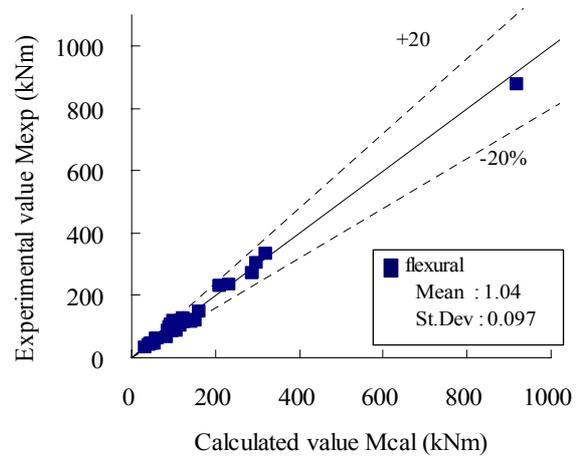
ここで、 m ($=M/(A_g D f_p)$) と n ($=N/(A_g f_p)$) はそれぞれ無次元化終局曲げ耐力と軸力比、 m_0 と n_0 は N - M 曲線のピーク点座標、 K は横補強筋による拘束効果を表すパラメーター、 A_g は柱の全断面積、 r ($=f_{ys} p_g / f_p$) は主筋の寄与度合いを表すものである。これらのパラメーターは以下のように求められる。

$$n_0 = \frac{1}{\pi} (0.1K^2 + 1.3K - 2.2K^{-1} f_p \times 10^{-3}) \quad (2)$$

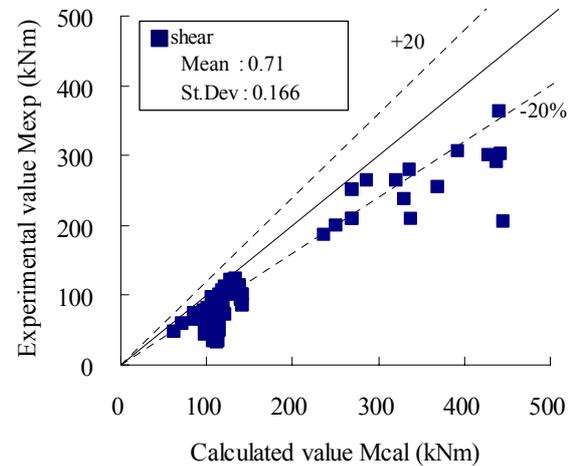
$$m_0 = \frac{1}{\pi} \left[0.31K + (0.61K - 0.85) f_p \times 10^{-3} + r \frac{D_s}{D_c} \right]$$

$$K = \frac{f_{cc}}{f_p} = 1 + 2.05 \frac{\rho_h \cdot f_{yh}}{f_p} \left(1 - \frac{s}{2 \cdot D_c} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 ρ_h は帯筋の体積比 (p_w の 2 倍)、 f_{yh} は帯筋の降伏点応力、 s は間隔、 D_c は帯筋中心間直径、 f_p は無拘束コンクリート強度 (シリンダー強度の 0.85 倍とする) である。なお、式(2)と(3)における f_{yh} と f_p の単位は MPa である。



(a) 曲げ破壊先行試験体



(b) せん断破壊試験体

図 - 1 終局曲げ耐力の比較

図 - 1 は既往の円形断面試験体の曲げ耐力に関する比較を示す。計算曲げ耐力は、全断面無拘束断面 ($K=1.0$) として得られたものとコア断面のみ ($K>1.0$) として求めたもののうち大きいほうを取った。図 - 1 より、式(1)による終局曲

げ耐力設計式は曲げ破壊先行した試験体の実験結果を精度よく評価できることが分かる。曲げ破壊先行した試験体の実験耐力と計算耐力の比は平均値が 1.04 で、標準偏差が 0.097 となっている。一方、せん断破壊試験体については、実験曲げ耐力と計算耐力との比は平均値が 0.71 となっている。これらのことはせん断破壊試験体が計算曲げ耐力を発揮できなかったことと、式(1)に示す曲げ設計式を用いれば、円形柱の破壊形式の判定が可能であることを示唆している。

3. 終局せん断耐力算定式の提案

円形断面部材の終局せん断耐力を直接求めるための設計式の誘導は、図 - 2 に示す部材のせん断破壊面における力の釣り合い条件から行う。まず、せん断破壊面と水平軸のなす角度を θ と、破壊面での垂直応力とせん断応力をそれぞれ σ_{cf} と τ_{cf} とおく。円形断面部材における主筋は通常対称配置されていることから、断面における圧縮鉄筋と引張鉄筋の軸力が互いに釣り合っていると仮定すれば、水平方向と鉛直方向の力の釣り合い条件から、式(4)と式(5)が導かれる。

$$N = \frac{\pi D^2}{4} (\sigma_{cf} + \tau_{cf} \cdot \tan \theta) \quad (4)$$

$$V_u = \frac{\pi D^2}{4} (\tau_{cf} - \sigma_{cf} \cdot \tan \theta) + \alpha \cdot A_{sh} f_{yh} \frac{D \cdot \tan \theta}{s} \quad (5)$$

ここで、 N は部材に作用する軸力（圧縮を正とする）、 V_u は部材の終局せん断耐力、 D は断面直径、 α は円形帯筋のフープ方向応力のせん断耐力方向の成分を近似するパラメーター、 A_{sh} 、 f_{yh} と s はそれぞれ一組帯筋の断面積、降伏点応力と軸方向間隔である。

一方、せん断破壊面でのコンクリートについては図 - 3 に示す Mohr-Coulomb 型の破壊線が一軸圧縮応力円および引張応力円と接すると仮定すれば、 σ_{cf} と τ_{cf} の間には B 点を起点とする直線式である式(6)が誘導される。

$$\tau_{cf} = \frac{1}{2\sqrt{\gamma}} \cdot f_c' + \frac{\gamma-1}{2\sqrt{\gamma}} \cdot \sigma_{cf} \quad (6)$$

ここで、 γ はコンクリートの一軸圧縮強度 f_c' と

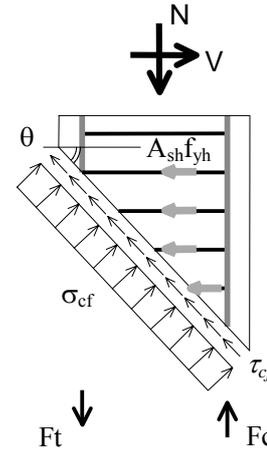


図 - 2 せん断破壊面における力の釣り合い

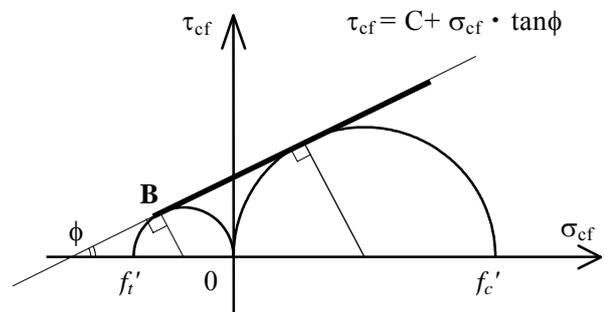


図 - 3 Mohr-Coulomb 型破壊条件

一軸引張強度 f_t' との比を表すものである。一般にコンクリートの圧縮強度は引張強度の約 10 倍に相当するとされていることから、 $\gamma = 10$ を式(6)に代入すると、コンクリートの破壊条件は次のように表される。

$$\tau_{cf} = 0.158 \cdot f_c' + 1.423 \cdot \sigma_{cf} \quad (7)$$

また、既往の研究²⁾に倣い、式(5)における α を $\pi/4$ としたうえで、コンクリートの一軸圧縮強度 f_c' に強度低減係数 v_c をかけてから、式(7)を式(4)と式(5)に代入すれば、円形断面部材の終局せん断耐力は次のように導くことができる。

$$V_u = \frac{(1.423 - \tan \theta) \cdot \eta + (1 + \tan^2 \theta) \cdot 0.158}{1 + 1.423 \cdot \tan \theta} \cdot v_c \cdot f_c' \cdot A_g + \frac{\pi}{4} \cdot A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot \frac{D}{s} \quad (8)$$

ここで、 η は軸力比である。

式(8)で円形断面部材の終局せん断耐力を算定するに当たっては、せん断破壊面の角度 θ およびコンクリート強度の低減係数 v_c を決めてお

く必要がある。以下これら二つのパラメータの決め方について述べる。

θ の値に最も影響を及ぼす因子として軸力の大きさと帯筋量が挙げられる。 θ の値は軸力と帯筋がない場合の45度から軸力の圧縮方向への増加に伴い大きくなっていく特徴を有することがよく知られている。しかしながら、軸力の大きさと帯筋量がせん断破壊面角度に及ぼす影響に関する実験データが殆ど報告されていない。このような現状を踏まえたうえ、設計式の簡便化を図るために、本論では θ の値として45度とし、それを式(8)に代入すると、

$$V_u = (0.175 \cdot \eta + 0.13) \cdot v_c \cdot f_c' \cdot A_g + \frac{\pi}{4} \cdot A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot \frac{D}{s} \quad (9)$$

が得られる。

一方、コンクリート強度の低減係数 v_c を評価するために、その実験結果を式(9)を用いて、終局せん断耐力の実験結果より逆算して求めた。図-4は v_c の逆算結果を示す。なお、図-4に示す実験結果はせん断破壊した試験体72体の結果である。

図-4から、 v_c はコンクリート強度の増加に伴い小さくなる傾向にあることは明らかである。逆算結果について回帰分析を行った結果、式(10)と式(11)に示す2種類の実験式が得られる。

$$v_{c1} = 0.68 - \frac{f_c'}{135} \quad (f_c' \text{ in MPa}) \quad (10)$$

$$v_{c2} = 0.90 \cdot \exp\left(-\frac{f_c'}{41}\right) \quad (f_c' \text{ in MPa}) \quad (11)$$

図-5に逆算による結果と、式(10)、式(11)および既往の算定式である学会指針式²⁰⁾、CEB式の比較を示す。式(10)と式(11)は既往の式より逆算結果の平均値を概ね評価しており、実験範囲内ではあまり差が見られないが、式(10)は圧縮強度が90MPaを超える高強度コンクリートに適用できないことが分かる。従って、以下では式(11)により考察を行う。

図-6に、 v_c の実験結果を式(11)で除したものと軸力比、柱断面直径との関係を示す。軸力比に関しては明確な相関関係は見られないもの

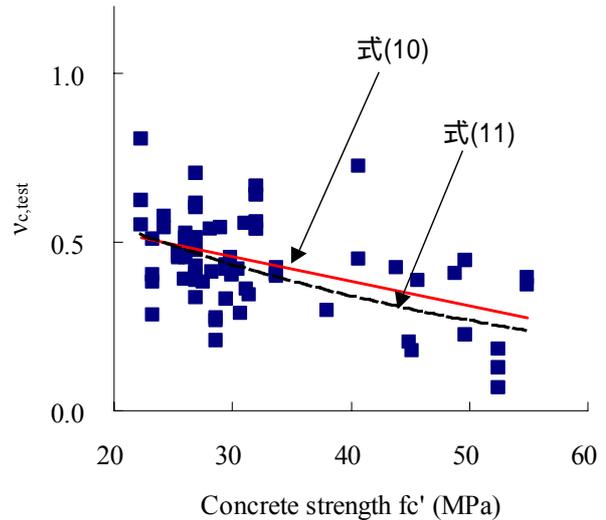


図-4 コンクリート強度低減係数の逆算結果

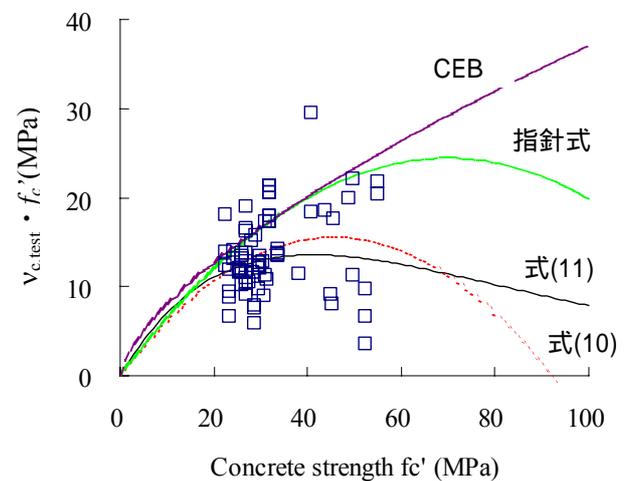


図-5 コンクリート強度低減係数の比較

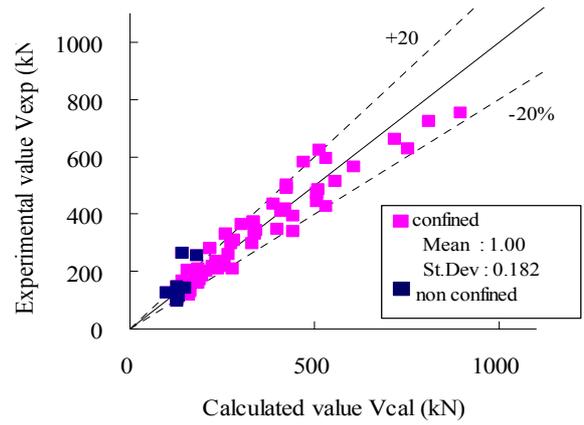
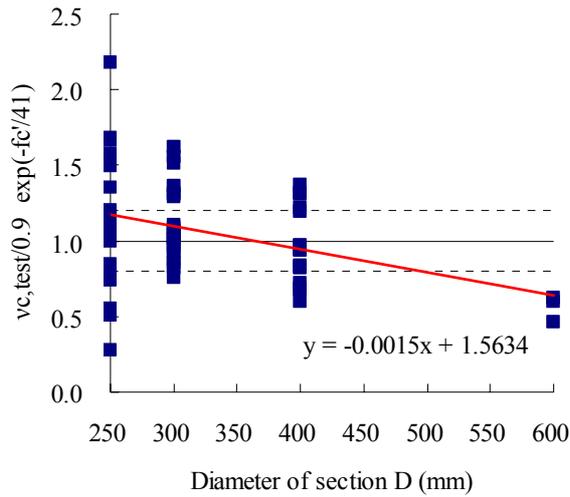
の、柱断面直径に関しては図に示すような相関関係が得られた。本論では、図-6に示す回帰式を式(11)と組み合わせた以下の式(12)をコンクリート強度の低減係数 v_c を求めるための実験式として提案する。

$$v_c = \left(1.4 - \frac{D}{740}\right) \cdot \exp\left(-\frac{f_c'}{41}\right) \quad (12)$$

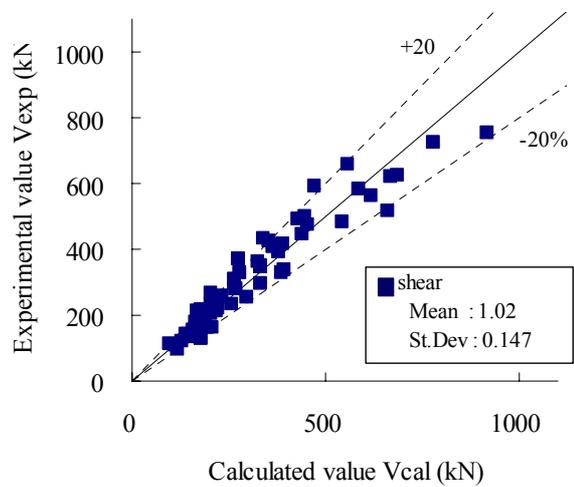
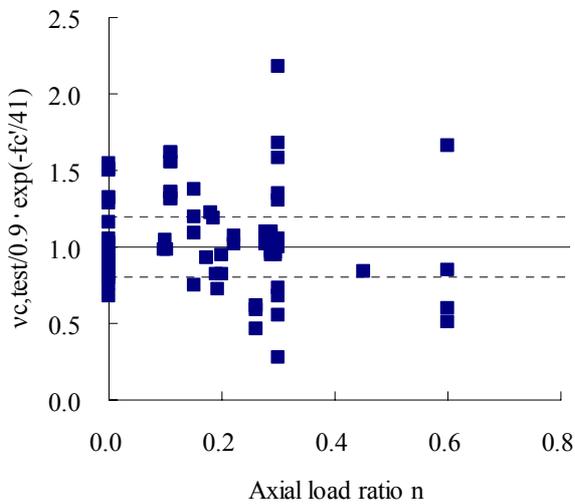
ただし、 D は600mm以下とする。

4. 提案式の妥当性の検証

本論で提案したせん断耐力算定式の妥当性を検証するために、本論2節で述べたせん断破壊した試験体72体について、式(9)と式(12)により求めた計算結果と実験結果との比較を図-7に



(a) 提案式

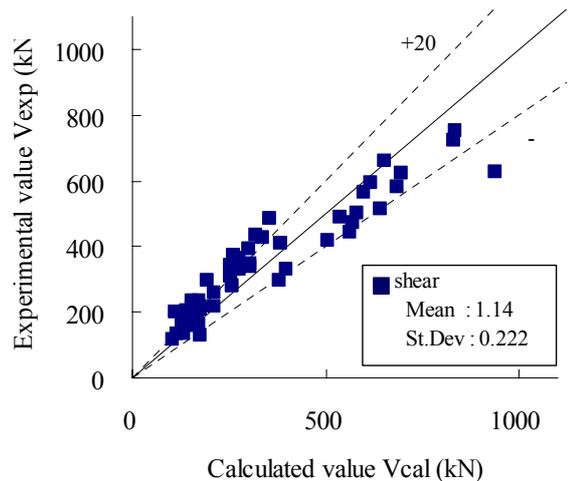


(b) 修正荒川 Mean 式 + 長方形断面置換

図 - 6 強度低減係数と断面直径，軸力比との関係

に示す。また，提案式の予測精度を見るために，円形断面を長方形断面に置換してから，学会指針式²⁰⁾と修正荒川 Mean 式とそれぞれ用いて得られた計算結果と実験結果との比較も合わせて図 - 7 に示す。

図 - 7 より，式(9)と式(12)により得られた計算値は，既往の研究²⁾で望ましい算定法とされている，「長方形断面置換」と修正荒川 Mean 式の組み合わせ方法による計算値とほぼ同じ精度で実験耐力を評価していることが分かる。せん断耐力の実験値と提案式による計算値との比は平均値が 1.00 で，標準偏差が 0.182 となっている。その統計結果に 7 体の帯筋なしの試験体を含めており，それらの試験体を除くと，実験耐



(c) 学会指針式 + 長方形断面置換

図 - 7 提案式の精度検証

力と計算耐力の比のは平均値が 0.99 で，標準偏差が 0.143 となっており，提案式の精度がより

よくなる。

結論

せん断破壊面における力の釣り合い条件とコンクリートに関する Mohr-Coulomb 型破壊条件を基にして、鉄筋コンクリート円形断面部材の終局せん断耐力を直接求めるための設計式を提案した。本提案式は比較的簡単であるほか、円形断面を矩形断面に置換することを要しない特徴を有する。また、既往の実験結果と比較した結果、本提案式は既往の設計式と同じ精度で実験耐力を評価できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 日本建築センター：構造計算指針・同解説，p. 232，1991 年
- 2) 林 静雄，他：鉄筋コンクリート造円形断面部材のせん断終局強度式の適用性，コンクリート工学，Vol.42, No. 2, pp.27-32, 2004 年 2 月
- 3) Sun Y. and Sakino K. : Simplified Design Method for Ultimate Capacities of Circularly Confined High-Strength Concrete Columns, ACI Special Publication, No. 193, pp. 571-585, 2000 年 9 月
- 4) 孫玉平，崎野健治：円形鋼管横補強 RC 柱の曲げ耐力算定式，日本建築学会大会，構造，No. 23226, 2002 年 8 月
- 5) 小川幸雄，他：軸力と曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱の強度と変形性状に関する実験研究，日本建築学会大会梗概集，pp.1727-1728，1980 年 9 月
- 6) 山野辺宏治，他：曲げせん断及び軸力を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱のせん断強度と変形性状に関する実験研究，日本建築学会大会，pp.1247-1248，1982 年 10 月
- 7) 伊藤光康，他：鉄筋コンクリート円形断面柱の復元力特性に関する実験研究 その 1 - 2，日本建築学会大会，pp.403-406，1986.8
- 8) 鈴木計夫，他：SD50 材の円形スパイラル筋を用いた RC 円形柱のせん断力・変形特性，コンクリート工学年次論文報告集 10-3 pp.601-606，

1988 年

- 9) 是永健好，他：異形 PC 棒鋼で横補強された場所打ち RC 杭のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集 20-3，pp.427-432，1998 年
- 10) 長江拓也，他：場所打ちコンクリート杭への高強度せん断補強筋の適用に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集 21-3，pp.403-408，1999 年
- 11) 酒向靖二，他：場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集 21-3，pp.493-498，1999 年
- 12) 新井元植，他：場所打ち鉄筋コンクリート杭の曲げせん断挙動に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集 22-3，pp.667-672，2000 年
- 13) 酒向靖二，他：場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に及ぼすせん断スパン比の影響，コンクリート工学年次論文報告集 22-3 pp.673-678，2000 年
- 14) 酒向靖二，他：円形断面を有する鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす構成素材の影響，コンクリート工学年次論文報告集 23-3，pp.181-186，2001 年
- 15) 山本俊彦，他：鉄筋コンクリート円形部材の曲げせん断性状に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集 23-3，pp.187-192，2001 年
- 16) 山本俊彦，他：高強度せん断補強筋を用いた円形 RC 柱の曲げせん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集 24-2，pp.181-186，2002 年
- 17) 金東範，他：RC 造柱の断面形状が損傷過程と終局性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集 24-2，pp.205-210，2002 年
- 18) 矢野伸司，他：円形断面鉄筋コンクリート部材の耐震性能評価に関する研究，日本建築学会大会，pp.337-338，2002.8
- 19) 中野秀夫，他：円形断面鉄筋コンクリート部材の耐震性能評価に関する研究，日本建築学会大会，pp.339-340，2002.8
- 20) 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・同解説，1999 年