

論文 袖壁付き RC 柱のせん断力 (Q) - 部材角 (R) スケルトンカーブ 評価に関する研究

磯 雅人*1・白都 滋*2

要旨：本研究では、既往の袖壁付き RC 柱部材のデータを用いて、せん断力(Q) - 部材角(R) 関係上の各特異点(弾性剛性, 曲げひび割れ耐力, 降伏時部材角, 曲げ終局耐力)および耐力低下部分について検討・評価され、袖壁付き RC 柱の Q - R 関係スケルトンカーブが提案される。提案される Q - R 関係スケルトンカーブは、袖壁付き RC 柱部分のせん断余裕度と柱部分のせん断余裕度の組合せにより、脆性型, 中間型(2種類), 靱性型と称した4つの Q - R 関係スケルトンカーブに分類したものであり、本提案で、おおむね袖壁付き RC 柱の Q - R カーブを評価できることが示される。

キーワード：袖壁付き RC 柱, 変形性能, せん断力(Q) - 部材角(R)関係スケルトンカーブ

1. はじめに

現在、袖壁付き RC 柱の変形性能評価に関する研究は、若林・南らによる、はり機構・アーチ機構を線材に置換して評価するモデル¹⁾やシート補強された袖壁付き RC 柱を対象とした益尾・井上らによるせん断余裕度を基にした限界部材角の評価方法²⁾の提案があるが、その研究資料は少なく、実験データそのものも十分とは言えない。また、RC 耐震診断基準³⁾における袖壁付き RC 柱の変形性能の取扱いは、破壊モードと形状 (h_0/H_0) によって変形性能(靱性指標:F 値)を安全、かつ、簡易に決定するが、その変形性能を十分に評価できているとは言いがたい。本研究では、袖壁付き RC 柱部材の変形性能に着目して検討・評価を行い、そのせん断力(Q) - 部材角(R) 関係スケルトンカーブモデルを提案することを目的とする。

2. Q - Rカーブの各特異点の検証

ここでは、RC 梁および RC 柱部材の両側に壁が均等に付帯した腰壁・垂れ壁付き RC 梁、両側袖壁付き RC 柱、エポキシ樹脂による接着のみでシート補強された両側袖壁付き RC 柱(以下、袖壁付き RC 柱と呼ぶ。)で、面内方向に加力された既往の研究データを用いて、図 - 1 に示す Q - R カーブ上の各特異点(弾性剛性, 曲げひび割れ耐

力, 降伏時部材角, 曲げ終局耐力)について検討・評価する。各特異点の検討では、実験値と既往の評価式による計算値との比較が行われ、その精度が検証される。なお、ここで検討・評価される内容は、3. で提案する Q - R 関係スケルトンカーブモデルの基礎となる。

2.1 弾性剛性

袖壁付き RC 柱²⁾⁴⁾⁶⁾の弾性剛性の実験値と計算値との比較を図 - 2 に示す。なお、弾性剛性計算値(wS_e)は、曲げ変形とせん断変形を考慮した下式(1)により行い、下記に示す3つの手法⁶⁾により算定する。

$$wS_e = 1 / \{ h_0^2 / (12E_c \cdot I_0) + \quad / (G \cdot A) \} \quad (1)$$

ここに、 h_0 :内法高さ

E_c :コンクリートのヤング係数
(RC 規準式)⁷⁾

I_0 : 中立軸回りの断面二次モーメント

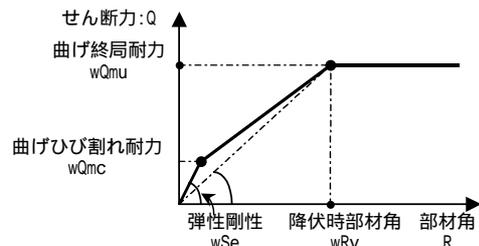


図 - 1 袖壁付き RC 柱の Q - R モデル

*1 福井大学 工学部建築建設工学科講師 博士(工学)(正会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所 PhD(正会員)

:せん断形状係数(下記(1) (2) (3)参照)
 G:せん断剛性 ($=E_c/2(1+)$)
 A:断面積(下記(1) (2) (3)参照)
 $=1/6 \quad =2.3$

(1)応力度法:断面積 A を袖壁付き RC 柱の断面積で評価して,せん断形状係数 を断面内のせん断応力度に基づく方法で評価する方法。

(2)エネルギー法:断面積 A を袖壁付き RC 柱の断面積で評価して,せん断形状係数 をせん断歪エネルギーに基づく方法で評価する手法。

(3)置換断面法:断面積 A を袖壁付き RC 柱の全せいと等しくし,かつ断面二次モーメント(鉄筋の影響は無視)が等しくなるような等価長方形断面積 A_e で評価して,せん断形状係数 $=1.2$ (エネルギー法)を用いて評価する手法。

同図より応力度法(○印)による比較では,比較値(=実験値/計算値)0.11~1.32,平均値0.61,変動係数48.3%,エネルギー法(△印)では比較値0.20~1.61,平均値0.76,変動係数43.0%,置換断面法(□印)では比較値0.27~2.13,平均値0.95,変動係数38.1%である。以上,ばらつきが大きい,本検討の範囲内では置換断面法がもっとも良い精度となっている。

2.2 曲げひび割れ耐力

袖壁付き RC 柱²⁾⁴⁾⁶⁾⁸⁾¹¹⁾の曲げひび割れ耐力の実験値と計算値との比較を図-3に示す。なお,曲げひび割れ強度計算値(wQ_{mc})は,下式(2)による。

$$wQ_{mc} = wM_{cr} / (h_0/2) \quad (2)$$

$$\text{ただし, } wM_{cr} = 0.56 \sqrt{f_B} \cdot Z + N \cdot Z / A$$

ここに, h_0 :クリアスパン

f_B :コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

N:軸力 A:全断面積

Z:袖壁を考慮した時の断面係数

式中の wM_{cr} は,コンクリートの曲げひび割れ時の引張応力度(σ_t)を0.56 f_B として,袖壁付き RC 柱に生じる軸応力($=N/A$)を配慮して求めた曲げひび割れモーメントである。同図より曲げひび割れ耐力の比較値は0.21~1.97,平均値1.02,変動係数36.8%であり,ばらつきが若干大きい,実験値は比較値=1.0 付近に分布する傾

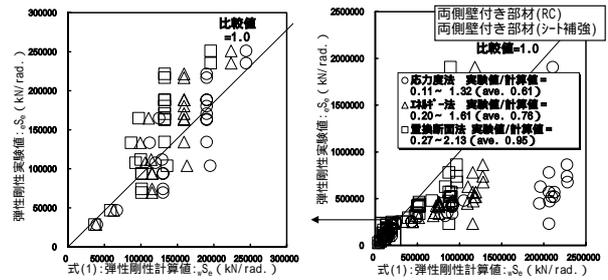


図-2 弾性剛性の実験値と計算値との比較

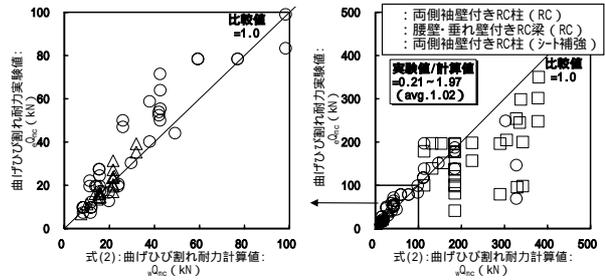


図-3 曲げひび割れ耐力の実験値と計算値との比較

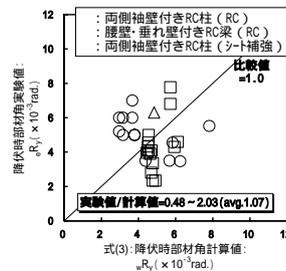


図-4 降伏時部材角の実験値と計算値との比較

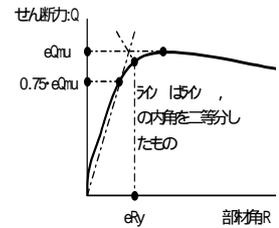


図-5 降伏部材角の実験値の定義

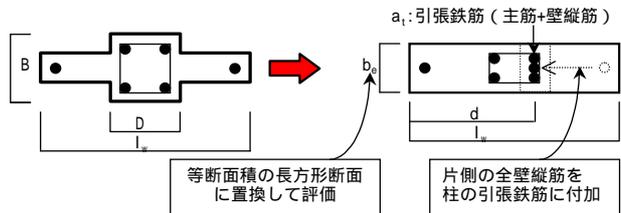


図-6 降伏時部材角算定のための仮定

向が認められる。

2.3 降伏時部材角

袖壁付き RC 柱²⁾⁵⁾⁶⁾⁸⁾¹¹⁾¹⁴⁾の降伏時部材角の実験値と計算値との比較を図-4に示す。なお,降伏時部材角実験値は,図-5に示す手法により,計算値(wR_y)は,下式(3)による。なお,せん断剛性(k_s)は2.1で示した置換断面法により算出する。

$$wR_y = wM_u / (y \cdot k_B) + wM_u / k_s \quad (3)$$

ここに, wM_u :曲げ終局モーメント計算値

(式(4)参照)

y :曲げ剛性低下率

k_B :曲げ剛性 k_S :せん断剛性

ただし, $k_B=6E_c \cdot I_0/h_0$ $k_S=G \cdot A_e \cdot h_0/(2 \cdot \gamma)$
 $\gamma=(0.043+1.64n \cdot p_{te}+0.043a/l_w+0.33 \cdot \gamma_0)(d/l_w)^2$

ここに, n :ヤング係数比 (=10)

$p_{te}=a_t/(b_e \cdot l_w)$ a :せん断スパン

l_w :壁を含めた断面の全せい

γ_0 :軸力比 (= $N/(b_e \cdot l_w \cdot B)$)

d :有効せい (図 - 6 参照)

a_t :引張鉄筋 (図 - 6 参照)

b_e :断面積と全せいの両者を原断面積と

等しくした仮想長方形断面の幅

*その他の記号は, 式(1), 式(2)参照

式(3)は, 曲げ変形とせん断変形を考慮した評価式であるが, せん断変形は弾性として評価する。なお, 式中の剛性低下率(γ_0)は, 図 - 6 のように袖壁付き RC 柱の断面を長方形断面に置換して, 引張鉄筋の断面積を引張側の柱主筋と壁縦筋を足し合わせた断面積と考えると, 菅野式を袖壁付き RC 柱に拡張して使用する。同図より降伏部材角実験値はばらつきが大きいものの, 比較値 1.0 付近に分布する傾向が認められる。比較値は 0.48 ~ 2.03, 平均値 1.07, 変動係数 42.1%であった。

2.4 曲げ終局耐力

袖壁付き RC 柱²⁾⁵⁾⁶⁾⁸⁾⁹⁾¹¹⁾¹²⁾¹⁴⁾の曲げ終局耐力の実験値と計算値との比較を図 - 7 に示す。曲げ終局耐力計算値(${}_wQ_{mu}$)は, 式(4)による曲げ累加強度式²⁾による。

$${}_wQ_{mu} = {}_wM_u / (h_0/2) \quad (4)$$

ただし,

$N_5 > N_4$ の時

$${}_wM_u = (0.8a_t \cdot \gamma \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c + M_{wu}) \cdot \frac{(N'_{max} + a_n \cdot \gamma + 2N_{wu} - N)}{(N'_{max} - 0.4b \cdot D \cdot F_c + N_{wu})}$$

$N_4 > N_3$ の時

$${}_wM_u = 0.8a_t \cdot \gamma \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c + M_{wu}$$

$N_3 > N_2$ の時

$${}_wM_u = 0.8a_t \cdot \gamma \cdot D + 0.5 \cdot (N + a_n \cdot \gamma - N_{wu}) \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{(N + a_n \cdot \gamma - N_{wu})}{(b \cdot D \cdot F_c)} \right\} + M_{wu}$$

$N_2 > N_1$ の時

$${}_wM_u = 0.8a_t \cdot \gamma \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{(N + a_n \cdot \gamma - N_{wu})}{N'_{min}} \right\} + M_{wu}$$

$N_1 > N_0$ の時

$${}_wM_u = M_{wu} \cdot \frac{(N - N'_{min} + a_n \cdot \gamma)}{N_{wu}}$$

ここに,

$$N_0 = N'_{min} - a_n \cdot \gamma$$

$$N_1 = N'_{min} - a_n \cdot \gamma + N_{wu}$$

$$N_2 = -a_n \cdot \gamma + N_{wu}$$

$$N_3 = 0.4b \cdot D \cdot F_c - a_n \cdot \gamma + N_{wu}$$

$$N_4 = 0.4b \cdot D \cdot F_c + a_n \cdot \gamma + N_{wu}$$

$$N_5 = N'_{max} + a_n \cdot \gamma + 2N_{wu}$$

$$N'_{min} = -2a_t \cdot \gamma \quad N'_{max} = b \cdot D \cdot F_c + 2a_t \cdot \gamma$$

$$N_{wu} = c \cdot t_w \cdot D \cdot F_c \quad M_{wu} = N_{wu} \cdot (1 + \gamma) \cdot D/2$$

c :袖壁コンクリートの有効係数 (=0.85)

a_n :中段筋の断面積 F_c :コンクリート圧縮強度

*その他の記号は, 文献 2)参照

同図より, 実験値は比較値 1.0 付近に分布し, おおむね良い適合性を示す。比較値は 0.86 ~ 1.39, 平均値 1.09, 変動係数 13.7%であった。

3. 袖壁付き RC 柱の Q - R 関係

スケルトンカーブモデル

3.1 Q - R 関係スケルトンカーブモデル

提案するせん断力(Q) - 部材角(R)関係スケルトンカーブモデルを図 - 8 に, 耐力低下部分のモデル模式図を図 - 9 に示す。提案する Q - R 関係スケルトンカーブモデルは, 袖壁付き RC 柱部分のせん断余裕度(${}_wQ_{su}/{}_wQ_{mu}$)と壁を無視した RC 柱部分のせん断余裕度(${}_cQ_{su}/{}_cQ_{mu}$)の組合せにより, 図 - 8 に示すように 4 つの破壊モードと Q - R 関係スケルトンカーブモデルに分類したものである。ここに, 袖壁付き RC 柱の曲げ終局強度(${}_wQ_{mu}$)は式(4)により, せん断終局強度(${}_wQ_{su}$)は下式(5)により算出する。

$${}_wQ_{su} = s \{ p_{we} \cdot w_y(j_e/j_t) + p_{she} \cdot s_y(j_w/j_t) + p_{fe} \cdot f_e(j_f/j_t) \} b_e \cdot j_t + \tan(\theta) \cdot b_e \cdot l_w \cdot c \cdot B/2 \quad (5)$$

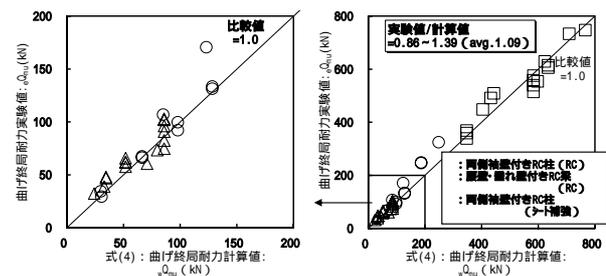


図 - 7 曲げ終局耐力の実験値と計算値との比較

袖壁を無視した柱部分の曲げ終局強度 (cQ_{mu}) は中段筋を考慮した累加強度式(式(4)の $N_{wu}=0$, $M_{wu}=0$ とした場合の式に相当する。) ²⁾により, せん断終局強度(cQ_{su})は下式(6)により算出する。

$$cQ_{su} = s \cdot p_w \cdot w_y \cdot B \cdot j_t + \tan(\theta) \cdot B \cdot D \cdot c \cdot B/2 \quad (6)$$

*式(5),(6)の詳細な記号の意味は文献 15)参照
式(6)中のせん断補強筋比 (p_w) は, 壁横筋が通し配筋の場合には, 壁横筋を p_w の算定に加える。さらに, シートの補強効果は, 最大耐力以降は, シートが剥離していると考えて, ここでは無視する。

図 - 8 に示した Q - R 関係スケルトンカーブ上の各特異点(弾性剛性, 曲げひび割れ耐力, 降伏時部材角, 曲げ終局耐力, 袖壁付き RC 柱および柱部分のせん断終局耐力)は, 上記で示した評価式により行い, 袖壁付き RC 柱および RC 柱の耐力低下部分は, 文献 16)で示した潜在せん断耐力 - 部材角関係を適用して検討する。なお, 本耐力低下モデルは, ヒンジ領域部分の回転によりコンクリートが圧壊させられ, それに起因して本来持っているせん断耐力が徐々に低下するために耐力低下すると考えてモデル化したものである。ヒンジ部の微小要素部分を図 - 9 のように仮定したトラス材に置換して, 斜材のひずみ度を ϵ_d とすると, 下式(7)による部材角 (R) と斜材のひずみ度 (ϵ_d) 関係が得られる。

$$R = 2 \cdot \epsilon_d \quad (7)$$

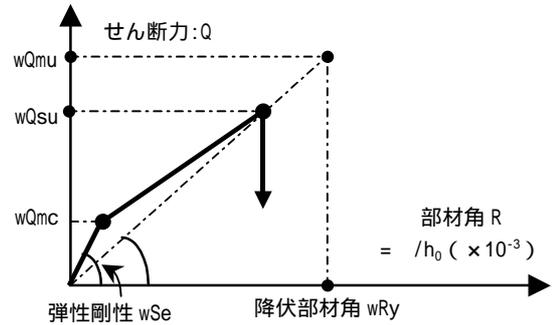
また, 斜材のコンクリートの軟化モデルは, 下式(8)による Kent-Park モデル ¹⁷⁾ を修正したものを使用する。なお, 袖壁付き RC 柱の軟化モデルは, 袖壁部分が扁平形状であり, 拘束効果が期待できないために, 無拘束状態のコンクリートとしてモデル化する。一方, 柱部分は帯筋による拘束効果が期待できるために, 帯筋により拘束されたコンクリートとしてモデル化する。

$$\epsilon_d = B \cdot \{1 - Z(\epsilon_d - \epsilon_0)\} - \epsilon_n \quad (8)$$

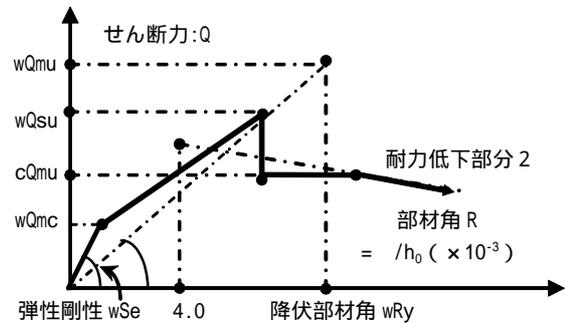
ただし, \cdot 軟化勾配(袖壁付き RC 柱の場合)

$$Z = 0.5 / (\epsilon_{su} - \epsilon_0) \quad (9)$$

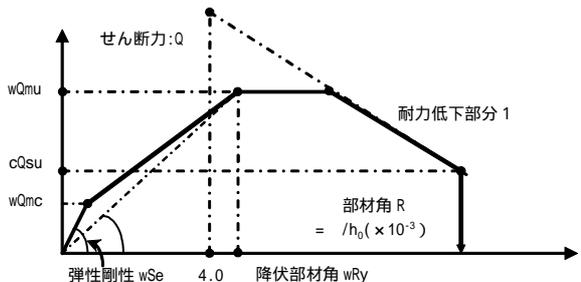
袖壁付き RC 柱せん断破壊・柱せん断破壊型 (脆性型)
($wQ_{su}/wQ_{mu} > 1.0$ かつ, $cQ_{su}/cQ_{mu} > 1.0$)



袖壁付き RC 柱せん断破壊, 柱曲げ破壊型 (WS 中間型)
($wQ_{su}/wQ_{mu} > 1.0$ かつ, $cQ_{su}/cQ_{mu} > 1.0$)



袖壁付き RC 柱曲げ破壊・柱せん断破壊型 (CS 中間型)
($wQ_{su}/wQ_{mu} > 1.0$ かつ, $cQ_{su}/cQ_{mu} > 1.0$)



袖壁付き RC 柱曲げ破壊・柱曲げ破壊型 (靱性型)
($wQ_{su}/wQ_{mu} > 1.0$ かつ, $cQ_{su}/cQ_{mu} > 1.0$)

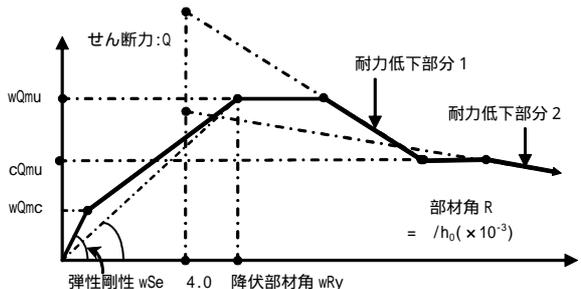


図 - 8 Q - R 関係スケルトンカーブモデル

靱性型は、実験値の傾向をおおむね精度良く捉えている。

4. まとめ

本研究では、既往の袖壁付き RC 柱部材のデータを用いて、せん断力(Q) - 部材角(R)関係上の各特異点(弾性剛性, 曲げひび割れ耐力, 降伏時部材角, 曲げ終局耐力)および耐力低下部分について検討・評価を行い, 袖壁付き RC 柱の Q - R 関係スケルトンカーブを提案した。

提案した Q - R 関係スケルトンカーブは, 袖壁付き RC 柱部分のせん断余裕度と柱部分のせん断余裕度の組合せにより, 脆性型, 中間型(2種類), 靱性型と称した4つの Q - R 関係スケルトンカーブに分類したものであり, 本提案で, おおむね袖壁付き RC 柱の Q - R カーブを評価できることを示した。

また, 課題として脆性型モデルでは, 曲げひび割れ後の剛性がやや高くなる傾向が見られ, 今後, せん断剛性低下を考慮する必要があることが示された。また, 本 Q - R 関係スケルトンカーブモデルでは, ヒンジ領域長さおよび曲げによるヒンジ回転能力の考慮がされておらず, 今後の課題と言える。

謝辞 本研究では, 以下の文献に示されている貴重な実験データを使用させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 若林實, 南宏一ほか: 袖壁付き柱の終局耐力の評価法に関する基礎的研究, 京大防災研究所年報, 第28号B-1, pp.1-15, 1985.4
- 2) 益尾潔, 井上寿也ほか: CF アンカーを用いた袖壁付き柱の炭素繊維シート補強 - 面内加力下の補強効果 -, GBRC95, pp.1-13, 1999.7
- 3) (財)日本建築防災協会: 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001.10
- 4) 磯雅人, 松崎育弘, 園部泰寿ほか: 連続繊維シートによりせん断補強された袖壁付き RC 柱の構造性能に関する実験的研究, 日本

建築学会構造系論文集, No.526, pp.117-124, 1999.12

- 5) 大久保全陸, 東洋一ほか: 腰壁, たれ壁付き鉄筋コンクリート梁の弾塑性挙動に関する実験的研究(その1), 日本建築学会論文報告集, No.204, pp.1-8, 1973.2
- 6) 大久保全陸: 腰壁, たれ壁付き鉄筋コンクリート梁の弾塑性挙動に関する実験的研究(その2), 日本建築学会論文報告集, No.207, pp.9-17, 1973.5
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991
- 8) 東洋一, 大久保全陸: 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その9), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1305-1306, 1974.10
- 9) 王子和臣, 入江善久, 藤本一郎: 袖壁付き鉄筋コンクリート柱の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1433-1434, 1976.10
- 10) 王子和臣, 藤本一郎, 入江善久: 袖壁付き鉄筋コンクリート柱の挙動に関する実験的研究(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1587-1588, 1977.10
- 11) 大宮幸, 中村陽介, 松浦康人, 林静雄: RC造柱耐力・破壊性状に及ぼす袖壁形状および袖壁横筋の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.169-174, 2001.7
- 12) 益尾潔, 井上寿也, 尾谷透: RC造正方形断面柱および袖壁付き柱のカーボン繊維シートによるせん断補強実験, GBRC84, pp.30~51, 1996.10
- 13) 柳下和男, 千葉脩, 柳沢学, 角一行, 林田則光: 炭素繊維シートによる既存 RC 部材の耐震補強に関する研究(その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.273-274, 1998.9
- 14) 福本昇, 中澤敏樹, 益尾潔, 石渡康弘, 市川昌和: 定着金物と炭素繊維シート補強された袖壁付き柱に関する実験研究(その3, 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.321-324, 2000.9
- 15) 磯雅人, 松崎育弘, 園部泰寿ほか: 連続繊維シートによりせん断補強された袖壁付き RC 柱のせん断終局耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, No.542, pp.147-154, 2001.4
- 16) 磯雅人, 松崎育弘, 園部泰寿, 中村洋行: 袖壁付き RC 柱の変形性能評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.157-162, 2001.7
- 17) Dudley Charles Kent, Robert Park: Flexural members with confined concrete, Proceedings of ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969~1990, 1971.7