断面形状を考慮した角形 CFT 柱の設計式

DESIGN EQUATION OF RECTANGULAR CFT COLUMNS CONSIDERING SECTION SHAPE

藤本利昭 — * 1 田中宏和 — * 2
平出 亨 — * 3 竹中啓之 — * 4

Toshiaki FUJIMOTO — * 1 Hirokazu TANAKA — * 2
Tooru HIRADE — * 3 Hiroyuki TAKENAKA — * 4

キーワード：
コンクリート充填鋼管，柱材，長方形断面，設計式

Keywords:
Concrete filled steel tube, Column, Rectangular section, Design formula

Concrete filled steel tubular (CFT) columns have become popular as structural member used for buildings. In the current standards on CFT structures, the scope of design formula is limited circular and square section steel tubes. However, not only these steel tubes but rectangular section steel tubes is used for CFT columns. In this paper, the design formula of rectangular CFT columns is specified. Furthermore, this paper discusses the several issues using rectangular CFT columns on practical design.

1. はじめに

CFT 造は，超高層を中心とした大規模な建築物に数多く採用されてきた。更に近年では，CFT 造の普及に伴い比較的小規模な低層から中高層建築物にも広まりつつある。

超高層などの大規模建築物では，柱断面が大きくなることから，柱の鋼管には溶接組立箱形鋼管が用いられることが多い。この場合，柱断面の幅とせい，フランジとウェブの板厚を変えることにより，更に合理的な断面を設計することが可能であり，実際に採用された例も幾つかある。

一方，比較的小規模な建築物では，一般的に冷間成形角形鋼管が用いられることが多い。冷間成形角形鋼管では，その製造方法により，断面角部に R 形状を有するところに特徴がある。

CFT 造の設計は，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（以下，SRC 規準と略記）」¹⁾，「コンクリート充填鋼管設計施工指針（以下，CFT 指針と略記）」²⁾，並びに新都市ハウジング協会「コンクリート充填鋼管（CFT）技術指針・同解説（以下，新都市指針と略記）」³⁾などを基に行われるが，これら指針では，角形断面の設計式は全て正方形断面を対象に記述されており，長方形断面や角 R 部を有する CFT 柱の取り扱いが明記されていない。昨年改定された CFT 指針においても長方形断面の取扱いは「設計者が適宜判断して使用すること」と記述されているのみであり，設計式の誤用を避けるためにも明示する必要があると考えられる。

そこで本報では，CFT 指針の軸力と曲げモーメントを受ける柱の設計式を基に長方形断面および角 R 部を有する断面の具体的な設計式を明示すると共に，その影響ならびに設計上の留意点について報告

する。

2. 検討対象

CFT 柱に使用される角形鋼管は，主に溶接組立箱形鋼管と冷間成形角形鋼管である。ここではこれら 2 種類の鋼管を対象に検討を行うこととした。

溶接組立箱形鋼管は，平板を溶接して製作されることから，断面形状は，正方形と長方形が製作可能であり，更にフランジとウェブに異なる厚さの鋼板を使用することが可能である。よって，溶接組立箱形鋼管については，フランジとウェブの板厚が異なる長方形断面を対象に CFT 柱の設計式を明示することとした。

一方冷間成形角形鋼管は，主として正方形断面が用いられるが，長方形断面も製作可能である。但し溶接組立箱形鋼管と異なり，鋼管は 1 シームの場合 1 枚，2 シームの場合 2 枚の鋼板から製作されるため，フランジおよびウェブは同一の板厚となる。よって冷間成形角形鋼管については，フランジとウェブが同じ板厚の角 R 部を有する長方形断面の CFT 柱の設計式を明示することとした。

3. 設計式

3.1 フランジとウェブの板厚の異なる長方形鋼管を用いた CFT 柱

SRC 規準，CFT 指針，新都市指針の設計式では，角形鋼管に関しては正方形断面を対象としていることから，断面の幅とせいの分類，更にはフランジとウェブの厚さが分類されていない。よって長方形断面に適用するためには設計式の内容を充分理解しないと誤って用いられることが考えられる。ここでは，これらを分類した設計式を

¹⁾ 安藤建設技術研究所 上席研究員・博士（工学）
（〒356-0058 埼玉県ふじみ野市大井中央 1-19-61）

²⁾ ㈱奥村組東日本支社建築設計部 課長

³⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 研究主任

⁴⁾ 戸田建設技術研究所

¹⁾ Research Engineer, ANDO Corporation Research Center, Dr. Eng.

²⁾ Manager, Building Design & Planning Dept., East Japan Branch, Okumura Corporation

³⁾ Research Engineer, R&D Institute, Takenaka Corporation

⁴⁾ Research Engineer, Technical Research Institute, Toda Corporation

明示する。

a) 断面性能

長方形鋼管を用いた CFT 柱の軸耐力および軸剛性の算定に用いる鋼管部分、コンクリート部分の断面積 sA , cA は下式で表せる。

$$sA = B \cdot D - cB \cdot cD, \quad cA = cB \cdot cD \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, B : 鋼管の断面幅

D : 鋼管の断面せい

cB : コンクリートの断面幅 ($=B-2t_w$)

cD : コンクリートの断面せい ($=D-2t_f$)

t_w : 鋼管ウェブの板厚

t_f : 鋼管フランジの板厚

同様に, 長方形 CFT 柱の曲げ剛性の算定に用いる鋼管部分, コンクリート部分の断面 2 次モーメント sI , cI は下式で表せる。

$$sI = \frac{1}{12} (B \cdot D^3 - cB \cdot cD^3), \quad cI = \frac{cB \cdot cD^3}{12} \quad \dots\dots\dots (2)$$

b) 軸方向力および曲げモーメントを受ける部材の許容耐力

CFT 柱の鋼管部分の許容耐力 (長期, 短期) 算定に用いる長方形断面の断面積 sA は式(1)を, 断面係数 sZ は以下の式を用いて行う。

$$sZ = 2sI/D \quad \dots\dots\dots (3)$$

CFT 短柱のコンクリート部分の許容耐力は, CFT 指針に示された式を長方形断面について書き換えると, 以下のように表される。

・中立軸 x_n が cD 断より小さい場合

$$cN = \frac{1}{2} cB \cdot x_n \cdot f_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$cM = \frac{1}{12} cB \cdot x_n (3cD - 2x_n) \cdot f_c \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで, x_n : コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離

f_c : コンクリートの許容圧縮応力度

・中立軸 x_n が cD 断より大きい場合

$$cN = \left(1 - \frac{cD}{2x_n}\right) cB \cdot cD \cdot f_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$cM = \frac{cB \cdot cD^3 \cdot f_c}{12x_n} \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方 CFT 長柱のコンクリート部分の許容耐力 (長期, 短期) は, 曲げ耐力 cM_{max0} を基に算定される。 cM_{max0} については後述する。

c) 軸方向力および曲げモーメントを受ける部材の終局耐力

CFT 短柱の鋼管部分の終局曲げ耐力は, CFT 指針の式を以下のように書き換えられる。

$$sN_u = 2(2x_n - cD) \cdot t_w \cdot F_y \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$sM_u = \{B \cdot t_f (D - t_f) + 2t_w (cD - x_n) x_n\} F_y \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで, F_y : 鋼管の降伏強度

同様に CFT 短柱のコンクリート部分の終局曲げ耐力は, 以下のように書き換えられる。

$$cN_u = x_n \cdot cB \cdot F_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$cM_u = \frac{1}{2} (cD - x_n) cB \cdot x_n \cdot F_c \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで, F_c : コンクリートの設計基準強度

なお, CFT 長柱の鋼管部分の終局耐力の算定に用いる長方形断面の塑性断面係数 sZ_p は以下の式を用いて行う。

$$sZ_p = B \cdot t_f (D - t_f) + \frac{1}{2} t_w \cdot cD^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

また, CFT 長柱のコンクリート部分の終局耐力の算定で用いる cM_{max0} は, 中立軸が断面せいの中央にある場合の終局曲げ耐力として, 式(11)の x_n を $cD/2$ に置き換えることで以下の式が得られる。

$$cM_{max0} = \frac{F_c \cdot cB \cdot cD^2}{8} \quad \dots\dots\dots (13)$$

本節で示した式は, $B=D$, $cB=cD$, $t_f=t_w$ とすることで, CFT 指針の正方形断面の設計式と同一の式になる。

図1 長方形断面 CFT 柱

3.2 角 R 部を有する長方形鋼管を用いた CFT 柱

ここでは, 冷間成形角形鋼管を用いた CFT 柱を対象に, 2 章で述べたようにフランジとウェブの厚さを同一とした式を明示する。

a) 断面性能

図2に示すような, 角 R 部を有する長方形 CFT 柱の鋼管部分の断面積 sA , コンクリート部分の断面積 cA は下式で表せる。

$$sA = 2 \cdot t \{B + D - 4R\} + \pi (R^2 - r^2) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$cA = (cB - 2r)(cD - 2r) + 2r(cB + cD - 4r) + \pi \cdot r^2 \\ = cB \cdot cD - r^2 (4 - \pi) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで, t : 鋼管の板厚

R : 鋼管角部外側の曲げ半径

r : 鋼管角部内側の曲げ半径 ($=R-t$)

同様に, 鋼管部分, コンクリート部分の断面 2 次モーメント sI , cI は下式で表せる。

(a) CFT 断面 (b) 鋼管断面 (c) コンクリート断面
図2 角 R 部を有する長方形断面 CFT 柱

$$\begin{aligned}
{}_s I &= \frac{t(D-2R)^3}{6} + \frac{(B-2R)}{12} (D^3 - {}_c D^3) + \left(\frac{\pi}{4} - \frac{16}{9\pi} \right) (R^4 - r^4) \\
&\quad + \left(\frac{D}{2} + \frac{4}{3\pi} R - R \right)^2 \pi R^2 - \left(\frac{{}_c D}{2} + \frac{4}{3\pi} r - r \right)^2 \pi r^2 \quad \dots (16) \\
{}_c I &= \frac{r({}_c D - 2r)^3}{6} + \frac{({}_c B - 2r){}_c D^3}{12} \\
&\quad + \left(\frac{\pi}{4} - \frac{16}{9\pi} \right) r^4 + \left(\frac{{}_c D}{2} + \frac{4}{3\pi} r - r \right)^2 \pi r^2 \quad \dots (17)
\end{aligned}$$

b) 軸方向力および曲げモーメントを受ける部材の許容耐力

鋼管部分の許容耐力の算定に用いる断面係数 ${}_s Z$ は式(3)による。但し式(3)中の鋼管部分の断面 2 次モーメント ${}_s I$ は式(16)の値を用いる。

CFT 短柱のコンクリート部分の許容耐力は、コンクリート断面を幅が $({}_c B - 2r)$ でせいが ${}_c D$ の領域（領域 A）、幅が $2r$ でせいが $({}_c D - 2r)$ の領域（領域 B）および角の半径 r の領域（領域 C）に分けて考えると、以下のように表せる。

・中立軸が断面内のとき ($r \leq x_n \leq {}_c D - r$)

$${}_c N = {}_c N_A + {}_c N_B + {}_c N_C$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} ({}_c B - 2r) \cdot x_n + \frac{r(x_n - r)^2}{x_n} + r^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{r}{x_n} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2}{3} \right) \right) \right\} f_c \quad \dots (18)$$

$$\begin{aligned}
{}_c M &= {}_c M_A + {}_c M_B + {}_c M_C \\
&= \left\{ \frac{x_n}{2} ({}_c B - 2r) \left(\frac{{}_c D}{2} - \frac{x_n}{3} \right) + \frac{r(x_n - r)^2}{x_n} \left(\frac{{}_c D}{2} - \frac{2}{3} r - \frac{x_n}{3} \right) \right\} f_c \quad (19) \\
&\quad + \frac{r^2}{x_n} \left\{ \frac{\pi}{2} (x_n - r) \left(\frac{{}_c D}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right) + \frac{2r}{3} \left(\frac{{}_c D}{2} - r + \frac{3\pi r}{16} \right) \right\} f_c
\end{aligned}$$

ここで、 ${}_c N_A$, ${}_c N_B$, ${}_c N_C$: 領域 A, B, C それぞれの負担軸力

${}_c M_A$, ${}_c M_B$, ${}_c M_C$: 領域 A, B, C それぞれの負担曲げ耐力

・中立軸が断面外 のとき (${}_c D < x_n$)

$$\begin{aligned}
{}_c N &= {}_c N_a + {}_c N_b + {}_c N_c \\
&= \frac{(2x_n - {}_c D)}{2x_n} \left\{ ({}_c B - 2r) {}_c D + 2r({}_c D - 2r) + \pi r^2 \right\} f_c \quad \dots (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_c M &= {}_c M_a + {}_c M_b + {}_c M_c \\
&= \frac{1}{x_n} \frac{{}_c D}{12} \left\{ ({}_c B - 2r) {}_c D^2 + 2r({}_c D - 2r) {}_c D \right\} f_c \quad (21) \\
&\quad + \frac{r^2}{x_n^2} \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{{}_c D}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right) ({}_c D - 2r) + \frac{4}{3} r \left(\frac{{}_c D}{2} - r + \frac{3\pi r}{16} \right) \right\} f_c
\end{aligned}$$

一方 CFT 長柱のコンクリート部分の許容耐力の算定で用いる曲げ耐力 ${}_c M_{\max 0}$ は下式により算定できる。

$$\begin{aligned}
{}_c M_{\max 0} &= \frac{1}{8} ({}_c B - 2r) {}_c D^2 \cdot F_c \\
&\quad + \left\{ \frac{1}{4} ({}_c D - 2r)^2 \cdot r + \frac{\pi r^2}{2} \left(\frac{{}_c D}{2} - r \left(1 - \frac{4}{3\pi} \right) \right) \right\} \cdot F_c \quad \dots (22)
\end{aligned}$$

c) 軸方向力および曲げモーメントを受ける部材の終局耐力

CFT 短柱の鋼管部分の終局曲げ耐力は、中立軸が $(r \leq x_n \leq {}_c D - r)$ の時以下のように表せる。

$${}_s N_u = 2(2x_n - {}_c D) \cdot t \cdot F_y \quad \dots (23)$$

$$\begin{aligned}
{}_s M_u &= \left\{ (D - t)(B - 2R) \cdot t + 2t(x_n - r)({}_c D - r - x_n) \right\} F_y \\
&\quad + \left\{ \left(\frac{D}{2} + \frac{4}{3\pi} R - R \right) \pi R^2 - \left(\frac{{}_c D}{2} + \frac{4}{3\pi} r - r \right) \pi r^2 \right\} F_y \quad \dots (24)
\end{aligned}$$

同様に CFT 短柱のコンクリート部分の終局曲げ耐力は、以下のよう表せる。

$${}_c N_u = \left\{ {}_c B \cdot x_n - r^2 \left(2 - \frac{\pi}{2} \right) \right\} \cdot F_c \quad \dots (25)$$

$$\begin{aligned}
{}_c M_u &= \frac{1}{2} ({}_c B - 2r)({}_c D - x_n) \cdot x_n \cdot F_c \\
&\quad + \left\{ r({}_c D - r - x_n)(x_n - r) + \frac{\pi r^2}{2} \left(\frac{{}_c D}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right) \right\} \cdot F_c \quad \dots (26)
\end{aligned}$$

なお、CFT 長柱の鋼管部分の終局耐力の算定で用いる塑性断面係数 ${}_s Z_p$ は下式のように表せる。

$$\begin{aligned}
{}_s Z_p &= (B - 2R)(D - t) + \frac{1}{2} t(D - 2R)^2 + \left(\frac{D}{2} + \frac{4}{3\pi} R - R \right) \pi R^2 \\
&\quad - \left(\frac{{}_c D}{2} + \frac{4}{3\pi} r - r \right) \pi r^2 \quad \dots (27)
\end{aligned}$$

また、CFT 長柱のコンクリート部分の終局耐力の算定では、式(22)に示した ${}_c M_{\max 0}$ を基に算定できる。

上記の式は、 $B=D$, ${}_c B={}_c D$ と置けば、角 R 部を有する正方形断面の設計式が得られる。

4. 断面形状の影響と設計上の留意点

4.1 長方形断面 CFT 柱

長方形断面の CFT 柱の耐力および剛性は、3.1 節に示した計算式を用いて算定すればよい。但し、長方形断面 CFT 柱に関する実験研究^{4), 5)}は、僅かに行われているのみであることから、設計にあたっては、安全側の評価になるような数値を採用することが望ましい。

各指針の CFT 柱の設計式は、幅厚比が制限値以内であれば鋼管の局部座屈を考えないで良いものとして構築されている。よって、鋼管のフランジおよびウェブが局部座屈しないよう B/t_f と D/t_w の両者が幅厚比制限値以内になるよう断面を設計する。

また鋼管の幅厚比は、CFT 柱の変形能力（限界部材角 R_u ）を求める際にも用いられるが、 B/t_f と D/t_w の内大きいほうの値を採用することで、安全側に評価できる。

CFT 柱の設計では、柱の座屈長さ L_k と断面せい D の比 L_k/D によって、短柱、中柱、長柱に分類され設計式が異なる。CFT 長柱の設計式は、面内の曲げ座屈を対象に構築された式であることから、長方形断面の場合においても、座屈長さ径比の評価には断面せい D を用いればよいものと考えられる。よって断面せいを大きくした長方形断面を用いることで、座屈長さ径比 L_k/D を小さく設計することも可能であるが、この場合には直交（面外）方向に対しては断面せいが小さくなり、座屈長さ径比 L_k/D が大きくなることから、横座屈に対する検討を行う必要がある。

4.2 角 R 部を有する角形断面 CFT 柱

(a) 角 R 部の断面性能への影響

角 R 部が CFT 部材の断面性能に及ぼす影響を明らかにするため、数値計算により検討を行った。なお簡単のため、正方形断面を対象とした。

図 3、図 4 に角 R 部を考慮した値と無視した場合の断面定数の計算値の比と幅厚比との関係を示す。図中には、軸方向耐力および剛性に影響する断面積 ${}_s A$, ${}_c A$ 、曲げ剛性に影響する断面 2 次モーメン

ト J , J , 許容曲げ耐力に關係する Z , cM , 終局曲げ耐力に關係する sZ_p , cM_{max0} を示している。なお、図 3 は冷間成形ロール鋼管を想定し $R=2.5t$ とした結果を、図 4 は冷間プレス鋼管を想定し $R=3.5t$ とした結果を示しており、幅厚比の範囲は実用上の範囲として、 $B/t=15\sim60$ について表示している。

鋼管およびコンクリートともに幅厚比が小さくなるほど断面性能に及ぼす角 R 部の影響が大きくなっている。また、充填コンクリートに比べ鋼管の影響が大きく、更に断面積、塑性断面係数、断面 2 次モーメント（断面係数）の順に影響が大きくなっている。

このことは、曲げ剛性への影響が最も大きいことを表している。また、幅厚比が 60 と大きくなった場合でも、断面の性能（剛性および耐力）は、冷間成形ロール鋼管で 2% 程度、冷間成形プレス鋼管で 2~3% 程度低下することがわかる。

一方コンクリートは、角 R 部による影響は小さいものの、冷間成形ロール鋼管で幅厚比が 20、冷間成形プレス鋼管で幅厚比が 30 を下回るような場合には、2% 程度の断面性能が低下する。

(b) 角 R 部を有する CFT 柱の設計上の留意点

角 R 部を有する断面では角 R 部を考慮した場合、幅厚比が小さいほど剛性が小さくなるため、設計時にその影響度合いを確認することが重要であり、剛性の評価には 3.2 に示した式を用いるべきである。

また、角 R 部を考慮した場合、軸耐力、曲げ耐力ともに小さくな

る。しかしながら、CFT 柱の設計式（耐力式）は、角 R 部を有する鋼管を用いた実験が混在した実験データに対して角部を無視した耐力式によりその精度が検証されていることから、角 R 部を無視しても実用上は問題ないものと考えられる。同様に、変形性能にも関係する軸力比の算定においても、その軸耐力には角 R 部を無視した軸耐力で検討が行われていることから、角 R 部を無視した軸耐力を用いても問題ないものと思われる。

但し、CFT 柱の鋼管に高張力鋼を用いる場合には、比較的幅厚比も小さくなるため鋼管の耐力分担が大きくなり、角 R 部の影響も大きくなることから、角 R 部の形状を適切に評価する必要があるものと考えられる。

5. まとめ

長方形断面ならびに角 R 部を有する長方形断面角形鋼管を CFT 柱に用いる場合の具体的な設計式を明示すると共にその設計上の留意点についてまとめた。

長方形断面については、設計式も比較的簡潔であり、適切に運用されることが望まれる。

角 R 部を有する CFT 柱については、角 R 部を考慮した場合の断面性能（剛性、耐力）への影響割合が、角 R 部の寸の法と幅厚比により求まることを示した。設計者は、断面性能と幅厚比の関係から角 R 部の影響を理解した上で CFT 柱の設計を行うことが重要である。

6. 今後の課題

断面形状による理論上の断面性能への影響は本報で示したとおりであるが、今後実験的にも検証されることが重要である。

特に長方形断面 CFT 柱は実験研究が少なく、実験的に検証されているとはいえない。今後の CFT 造の更なる普及を考えた場合、実験研究によりその性能を検証する必要がある。

角 R 部を有する CFT 柱に関しては、既に多くの実験で用いられているにも関わらず、角 R 部の有無や形状の取り扱い、耐力評価上の考慮の有無などが不明な文献が多い。角 R 部の影響を明らかにするためにも今後の実験研究においては、角 R 部の有無および形状に関する情報は、明記するべきである。

最後に、本研究は(社)新都市ハウジング協会 CFT 造・構造設計法研究会に設置された柱 WG の活動の一環として行われたものである。貴重なご意見を頂いた関係各位に心から謝意を表します。

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，2001
- 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008
- 3) 新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管（CFT）技術指針・同解説，2008
- 4) 管田裕樹，山口育雄，高木潤一，諸菱亮：長方形断面 CFT の中心圧縮性状に関する実験的研究 その 1~その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 分冊，p.1103-1106，2001
- 5) 高木潤一，東啓太，山口育雄：圧縮軸力下で単調な曲げせん断を受ける長方形断面 CFT 柱に関する研究 その 1~その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 分冊，p.1165-1168，2003

[2009 年 2 月 18 日原稿受理 2009 年 4 月 6 日採用決定]

図 3 角 R 部の断面性能への影響 ($R=2.5t$)

図 4 角 R 部の断面性能への影響 ($R=3.5t$)