

矩形 CFT 柱の曲げ性状に関する研究

— 終局耐力に関する設計式の検討 —

日大生産工(学部) ○大石 琴 日大生産工 藤本 利昭 日大生産工(院) 三浦 智美
日大生産工(院) 今井 皓己 日大生産工(学部) 助川 海都

1. まえがき

コンクリート充填鋼管 (Concrete Filled Steel Tube, 以下CFTと略記)構造は、鋼管にコンクリートを充填した構造であり、軸圧縮力を受けると膨張するコンクリートを鋼管が外側から拘束しているため、圧縮耐力、曲げ耐力、変形性能を増大させるコンファインド効果が期待できる。

その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の2種類があり、特に溶接組立箱形鋼管は大断面が可能になることから大規模な建築物の柱に多く適用されている。

更に、溶接組立箱形鋼管は、平板を溶接して製作されるため、断面の縦と横の比や、フランジとウェブを異なる板厚で製作でき、合理的な断面設計が可能になる。しかし、現在のCFT造の設計指針²⁾では正方形断面が対象とされており、長方形断面に関しては「設計者が適宜判断して使用すること」と記述されているだけである。また長方形断面を対象とした終局耐力式も報告されている³⁾が、その計算式の力学的意味は明示されていない。

一方で、設計自由度が増し、断面設定の幅が広がることにより、合理的な断面を設定するためには、設計者がCFT断面の性質を充分理解することが重要となる。

そこで本研究では、設計における技術資料とするため、文献³⁾を参考に、終局耐力式を明示し、その力学的意味を示すこととした。

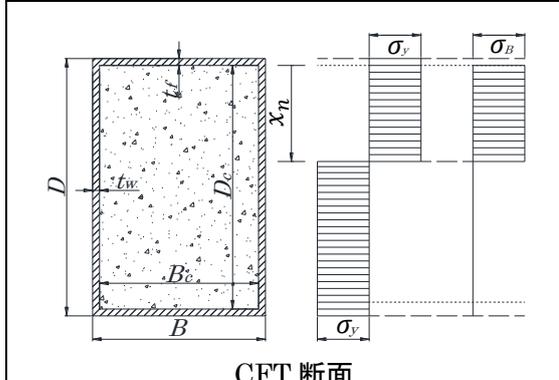
2. 終局耐力式

「コンクリート充填鋼管設計施工指針」²⁾では、CFT短柱の終局耐力を鋼管部分と充填コンクリート部分に分け、一般化累加で算定することとされている。一般化累加耐力は、終局耐力を求めることであり、終局時の充填コンクリートと鋼管の中立軸が一致した時のCFT断面の全塑性モーメントに等しくなる。

2.1. 記号の定義

ここでは、正方形と長方形、フランジとウェブで異なる板厚の鋼管を用いたCFT断面に適用できるように、表1に示す通り、幅とせい、板厚をフランジとウェブで区別した記号を用いて軸方向力および曲げモーメントを受けるCFT短柱の終局耐力式を明示することとした。

表1 記号の定義



記号	定義
B	鋼管の断面幅
D	鋼管の断面せい
B_c	コンクリートの断面幅
D_c	コンクリートの断面せい
t_w	鋼管ウェブの板厚
t_f	鋼管フランジの板厚
σ_y	降伏強度
σ_B	コンクリートの圧縮強度
x_n	コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離

2.2. 鋼管部分の終局耐力式

a) 鋼管の軸圧縮耐力

鋼管断面は、その力学的な役割から、フランジとウェブに分けて考える。鋼管の軸圧縮耐力は、断面積に降伏強度を乗じて求まるフランジとウェブそれぞれの軸圧縮耐力を足し合わせることで求める。圧縮力を正とした時、軸圧縮耐力は以下の式になる。

$$N_{sf} = 2Bt_f \cdot \sigma_y = 2A_f \cdot \sigma_y \quad (1)$$

$$N_{sw} = 2t_w(D - 2t_f)\sigma_y = 2A_w \cdot \sigma_y \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_{su} &= N_{sf} + N_{sw} \\ &= 2\sigma_y\{Bt_f + t_w(D - 2t_f)\} \\ &= 2\sigma_y(A_f + A_w) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 N_{sf} : 鋼管のフランジ部分の軸耐力、 N_{sw} : 鋼管のウェブ部分の軸耐力、 N_{su} : 鋼管の軸耐力、 A_f : フランジの断面積(= Bt_f)、 A_w : ウェブの断面積(= $t_w \cdot (D - 2t_f)$)を示す。

b) 鋼管の最大曲げ耐力

最大曲げ耐力は、軸力が0の時(中立軸が断面せいの中央にある時)であり、曲げモーメントは重心に作用する圧縮合力と引張合力によって生じる。

$$M_{sf} = Bt_f(D - t_f)\sigma_y = A_f \cdot d_{sf} \cdot \sigma_y \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{sw} &= \frac{t_w}{2} \cdot (D - t_f)^2 \sigma_y \\ &= \frac{A_w}{2} (D - 2t_f)\sigma_y \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{smax} &= M_{sf} + M_{sw} \\ &= \sigma_y\{Bt_f(D - t_f) + \frac{t_w}{2}(D - 2t_f)^2\} \\ &= \sigma_y(A_f \cdot d_{sf} + A_w \cdot d_{sw}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 M_{sf} : 鋼管のフランジ部分の最大曲げ耐力、 M_{sw} : 鋼管のウェブ部分の最大曲げ耐力、 M_{su} : 鋼管の最大曲げ耐力、 d_{sf} : フランジの重心間距離(= $D - t_f$)、 d_{sw} : ウェブの重心間距離(= $(D - 2t_f)/2$)を示す。

c) 中立軸がウェブ内($0 \leq x_n \leq D - 2t_f$)の時

曲げ耐力はフランジとウェブが、圧縮耐力はウェブ部分のみが負担するため以下のように示される。

$$N_s = 2t_w\{2x_n - (D - 2t_f)\}\sigma_y \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M_s &= 2t_w \cdot x_n \left\{ \left(\frac{D}{2} - t_f \right) - \frac{x_n}{2} \right\} \cdot 2\sigma_y \\ &\quad + M_{sf} \\ &= 2t_w \cdot x_n (D - 2t_f - x_n)\sigma_y + A_f \cdot d_{sf} \cdot \sigma_y \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 N_s : 鋼管の圧縮軸力、 M_s : 軸力 N_s が作用したときの鋼管の終局曲げ耐力を示す。

d) 鋼管の耐力曲線

図2に鋼管の耐力曲線を示す。 $-N_{sw}$, N_{sw} は、中立軸がフランジ内側にある時で、曲げモーメントはフランジが、軸力はウェブが負担する点を表している。中立軸が断面の中心($N = 0$)ある場合、全断面が曲げモーメントを負担し、鋼管の最大曲げ耐力に達する。 $-N_{sw}$ から N_{sw} の

間は、フランジ部分が曲げモーメントのみを負担し、ウェブ部分の曲げモーメントと軸力の負担割合で耐力曲線が変化する。

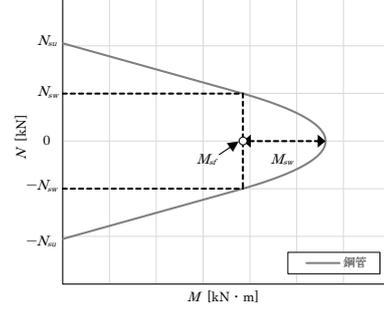


図1 鋼管の耐力曲線

2.3. コンクリート部分の耐力曲線

a) 軸圧縮耐力

軸圧縮耐力は、断面積に圧縮強度を乗じて求める。

$$\begin{aligned} N_{cu} &= (B - 2t_w)(D - 2t_f)\sigma_B \\ &= A_c \cdot \sigma_B \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 N_{cu} : コンクリートの最大圧縮耐力、 A_c : コンクリートの面積(= $(B - 2t_w)(D - 2t_f)$)

b) 最大曲げ耐力

最大曲げ耐力は中立軸が中心にある時($x_n = (D - 2t_f)/2$)で、以下のように示される。

$$\begin{aligned} N_c &= (B - 2t_w) \frac{(D - 2t_f)}{2} \sigma_B \\ &= \frac{B_c \cdot D_c \cdot \sigma_B}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} M_c &= (B - 2t_w) \frac{(D - 2t_f)}{2} \left\{ (D - 2t_f) - \frac{(D - 2t_f)}{2} \right\} \cdot \frac{\sigma_B}{2} \\ &= (B - 2t_w)(D - 2t_f)^2 \cdot \frac{\sigma_B}{8} \\ &= B_c \cdot D_c^2 \cdot \frac{\sigma_B}{8} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 N_c : コンクリートの圧縮軸力、 B_c : 充填コンクリートの幅(= $B - 2t_w$)、 M_c : コンクリートの曲げ耐力、 D_c : 充填コンクリートのせい(= $D - 2t_f$)を示す。

c) 中立軸が断面内($0 \leq x_n \leq (D - 2t_f)$)の時

曲げ耐力は以下のように示される。

$$N_c = (B - 2t_w) \cdot x_n \cdot \sigma_B \quad (12)$$

$$\begin{aligned} M_c &= (B - 2t_w)x_n \left\{ \frac{(D - 2t_f)}{2} - \frac{x_n}{2} \right\} \sigma_B \\ &= (B - 2t_w)x_n (D - 2t_f - x_n) \frac{\sigma_B}{2} \\ &= cB \cdot x_n \cdot (D_c - x_n) \frac{\sigma_B}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

d) コンクリートの耐力曲線

図2にコンクリートの耐力曲線を示す。コンクリートは圧縮にのみ耐えることができるため圧縮を正とした場合、耐力曲線は軸力が正の部分に表れ、軸力が最大圧縮耐力(N_{cu})の半分の時、最大曲げ耐力(M_{cmax})となる。

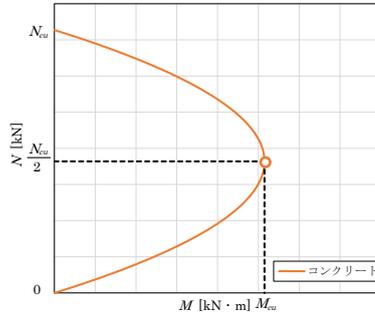


図2 コンクリートの耐力曲線

2.4. CFT断面の耐力曲線

2.2, 2.3よりCFTの耐力は以下のように示される。

a) 軸耐力

$$N_0 = N_{su} + N_{cu} \quad (14)$$

b) 最大曲げ耐力

コンクリートが最大曲げ耐力に達した時で以下のように示される。

$$N_{max} = \frac{N_{cu}}{2} \quad (15)$$

$$M_{max} = M_{smax} + M_{cmax} \quad (16)$$

c) 中立軸がウェブ断面内($0 \leq x_n \leq (D - 2t_f)$)

曲げ耐力は以下のように示される。

$$N = N_s + N_c \quad (17)$$

$$= 2t_w \{ 2x_n - (D - 2t_f) \} \sigma_y$$

$$+ (B - 2t_w) \cdot x_n \cdot \sigma_B$$

$$= 2t_w(2x_n - D_c) \sigma_y + B_c \cdot x_n \cdot$$

$$\sigma_B \quad (18)$$

$$M = M_s + M_c$$

$$= 2t_w \cdot x_n (D - 2t_f - x_n) \sigma_y$$

$$+ B t_f (D - t_f) \sigma_y$$

$$= x_n (D - 2t_f - x_n) \cdot$$

$$\left\{ 2t_w \sigma_y + (B - 2t_w) \frac{\sigma_B}{2} \right\}$$

$$+ B t_f (D - t_f) \sigma_y$$

$$= x_n (D - x_n) \left\{ 2t_w \sigma_y + \frac{\sigma_B}{2} \right\} + A_f d_{sf} \sigma_y \quad (19)$$

ここで、 N_u : CFTの終局圧縮耐力、 M_u : CFTの終局曲げ耐力を示す。

d) CFTの耐力曲線

図3にCFTの耐力曲線を示す。CFTでは、軸力が $-N_{sw}$, $-N_{sw} + N_{cu}$ の時、中立軸がフランジ内側にある時で、フランジは曲げモーメントを、ウェブとコンクリートは、軸力を負担することになる。CFTも最大曲げ耐力はコンクリートが最大曲げ耐力に達する時で $N = N_{cu}/2$ である。

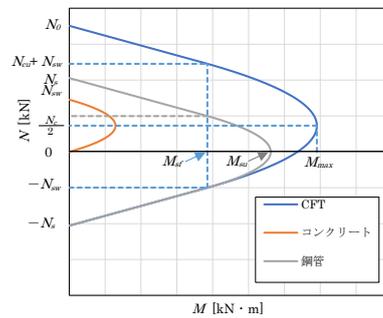


図3 CFTの耐力曲線

3. 検討

以上で明示した式を用いて長方形断面と正方形断面の場合の終局耐力について考察する。

3.1. 比較対象

正方形断面の幅とせい、正方形断面の板厚、降伏強度、コンクリートの圧縮強度は一般的に使用される値として文献²⁾の設計例の値を用いた。長方形断面は、幅とせいが1:2の比率になるような長さとし、板厚は、正方形断面の鋼管とコンクリートの面積が同じになるように求めた。表1に比較対象概要と終局耐力式で求めた最大曲げ耐力計算値 M_u を示す。またCFT造の設計指針²⁾より、軸力の制限値($0.7N_0$)を求めた。

表2 比較対象概要

比較対象	板厚 [mm]		幅 [mm]	せい [mm]	断面積 [mm ²]		降伏・圧縮強度 [N/mm ²]		計算最大曲げ耐力 [kN·m]	0.7N ₀ [kN]
	t _f	t _w			B	D	A _s	A _c		
650×650	25.0	25.0	650	650	62500	360000	325	48	6059	26315
920×460S	23.5	23.5	460	920	62651	360549	325	48	7949	26368
920×460W	23.5	23.5	920	460	62651	360549	325	48	4612	26368

3.2. 検討結果

図4に終局耐力式を用いて算定した鋼管、コンクリート、CFTそれぞれの軸力-曲げモーメントによる耐力曲線を示す。なおa)が正方形断面、b)長方形断面の強軸曲げ、c)が長方形断面の弱軸曲げの場合の耐力曲線である。

表2より最大曲げ耐力を比較すると長方形断面の短辺がフランジとなる強軸曲げの時、一番大きい値となり、長方形断面の短辺がウェブとなる弱軸曲げの時、一番小さい値となった。また、正方形断面の M_u に対して長方形断面の強軸曲げの際の M_u は1.75倍、弱軸曲げの際は0.55倍であった。

図4-b), c)より、長方形断面において弱軸曲げの時よりも強軸曲げの時の方が鋼管、コンクリート、CFTともに耐力が大きくなった。

図4-d)より、耐力曲線を比較すると、長方形断面の弱軸曲げ、正方形断面、長方形の強軸曲げの順で耐力曲線が大きくなった。

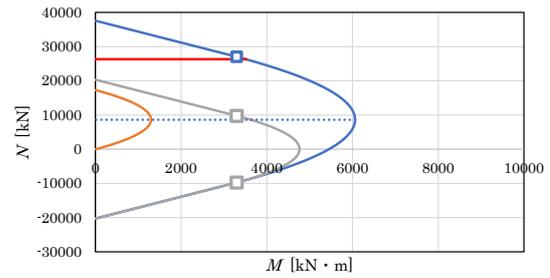
また、制限軸力値($0.7N_0$)はa), b)では、ウェブ部分が軸力を負担しているが、c)の弱軸曲げではフランジも軸力を負担する領域に入っており、長方形断面の制限軸力は今後検討の余地がありそうである。

4. まとめ

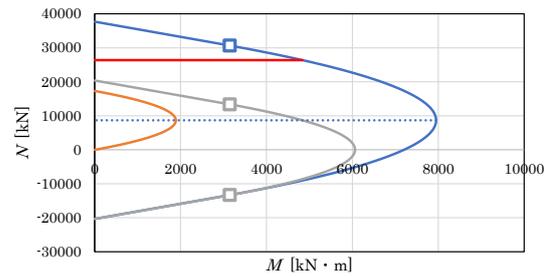
- 鋼管は軸力が0の時、コンクリートは軸力が軸圧縮耐力の1/2の時、最大曲げ耐力となる。
- CFTの最大曲げ耐力は、軸力がコンクリートの軸圧縮耐力の1/2の時に生じる。その最大曲げ耐力は、充填コンクリートと鋼管それぞれの最大曲げ耐力を足し合わせることで求められる。
- 長方形断面において強軸曲げの耐力曲線は鋼管、コンクリート、CFTにおいて弱軸曲げよりも大きくなる。
- 断面積が同じであれば、耐力曲線および最大曲げ耐力は正方形断面よりも短辺がフランジの強軸長方形断面の方が大きくなる。

参考文献

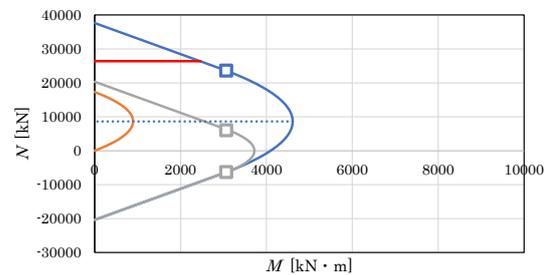
- 1) 松井千秋:コンクリート充填鋼管構造CFT構造の性能と設計, 株式会社オーム社, pp.43-48, 2009
- 2) 社会法人日本建築学会:コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 第2版, pp.244, 338-343, 2008
- 3) 藤本利昭, 田中宏和, 平出亨, 竹中啓之:断面形状を考慮した角形CFT柱の設計式, 日本建築学会技術報告集, 第15巻, 第31号, pp.757-760, 2009.10



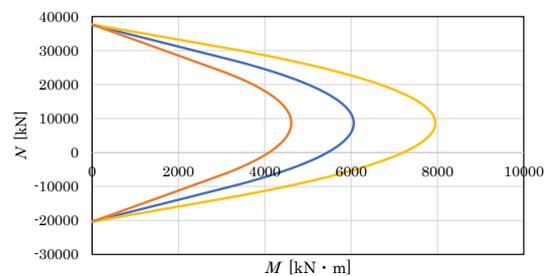
a) 650×650



b) 920×460S



c) 920×460W



d) CFTの耐力曲線

図4 終局耐力式による耐力曲線