

(8) コンクリート充填角形鋼管断面の累加強度と降伏強度について

津田 恵吾¹・城戸 将江²・劉 青崧³

¹正会員 北九州市立大学 教授 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail: tsuda@env.kitakyu-u.ac.jp

²正会員 北九州市立大学 講師 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail: kido@env.kitakyu-u.ac.jp

³学生 北九州市立大学 学部生 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail: k0605201@hibikino.ne.jp

コンクリート充填鋼管構造設計施工指針では、コンクリート充填鋼管短柱の曲げ耐力は、コンクリートの強度や、鋼管の強度、幅厚比が一般的に使用されるものであれば、累加強度で計算できるとしている。終局強度に関しては、終局強度理論による理論値や、実験値とも比較され、累加強度の妥当性が確認されている。終局耐力に関する理論と実験値との検討の多さに比べて、降伏強度と累加強度の関係はほとんど検討されておらず、両者の関係を明らかにしておくことは重要である。

本論文の研究目的は、CFT指針で示されている累加強度と、降伏強度（断面の最外縁が限界応力となったときの強度）を、角形鋼管の幅厚比、材料強度、コンクリートの圧縮強度とその時のひずみをパラメータに取り計算することにより、降伏強度と累加強度の関係を検討することである。

Key Words : Concrete filled tube, Column, Flexural strength, Superposed strength, Yield strength

1. はじめに

コンクリート充填鋼管構造設計施工指針¹⁾（以下、CFT 指針）や鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準²⁾では、コンクリート充填鋼管短柱の曲げ耐力は、コンクリートの強度や、鋼管の強度、幅厚比が一般的に使用されるものであれば、累加強度で計算できるとしている。終局強度に関しては、終局強度理論による理論値や、実験値とも比較され、累加強度の妥当性が確認されている。

ところで、CFT 指針では柱材の復元力特性において、スケルトンカーブを材端曲げモーメント M と部材角 R の関係を表す3本の直線でモデル化している（図1参照）。図1で初期剛性 K_e は、鋼管、充填コンクリート全断面積を弾性とした剛性を用い、第一折れ点（A点）の曲げ耐力 M_y は短柱の降伏曲げ耐力を、第二折れ点の曲げ耐力 M_u は終局曲げ耐力を用いることとしている¹⁾。

CFT 指針においては、第一折れ点の降伏曲げ耐力は、「短柱の降伏曲げ耐力は、断面を構成する材料の応力-ひずみ関係を用い、平面保持の仮定に基づいて計算された曲げモーメント-曲率関係において、コンクリートもしくは鋼管が降伏と判定されたときの曲げモーメントとして求めることができる。しかしながら、この方法は計算が若干煩雑であるため、断面を構成する各要素の降伏

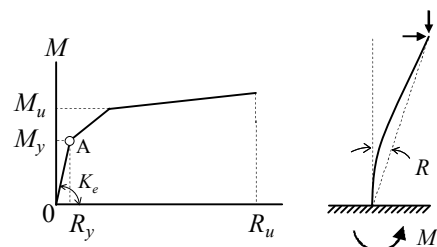


図1 CFT 指針の復元力特性モデル

曲げ強度を累加する手法によって耐力を評価することが多い¹⁾として、累加強度によって算定することとなっている。復元力特性モデルと実験挙動との対応も多少検討されているものの、終局耐力に関する理論と実験値との検討の多さに比べて、降伏強度と累加強度の関係はほとんど検討されておらず、両者の関係を明らかにしておくことは重要である。

本論文の研究目的は、CFT 指針で示されている累加強度と、降伏強度（断面の最外縁が限界応力となったときの強度）を、角形鋼管の幅厚比、材料強度、コンクリートの圧縮強度とその時のひずみをパラメータに取り計算することにより、降伏強度と累加強度の関係を検討することである。

2. 解析

(1) 累加強度の算定

角形 CFT 断面の降伏強度との比較を行なうため、累加強度を算定する。この強度は、コンクリート、鋼管の各要素の降伏曲げ強度の累加で強度を評価するものであるが、許容応力度設計における短期許容曲げモーメントと同じである。累加強度は(1)式で表現される単純累加強度式¹⁾で算定した。

$$(1) \quad \begin{cases} 0 \leq N \leq {}_c N_y \\ N = {}_c N \\ M_y = {}_s M_0 + {}_c M \\ N \geq {}_c N_y \\ N = {}_c N_y + {}_s N \\ M_y = {}_s M \end{cases}$$

ここで、 ${}_c N$ 、 ${}_c M$ はそれぞれコンクリート部分の許容圧縮力と許容曲げモーメント、 ${}_s N$ 、 ${}_s M$ はそれぞれ鋼管部分の許容圧縮力と許容曲げモーメントである。また、 ${}_c N_y = \frac{2}{3} {}_c A \cdot {}_c \sigma_B$ 、 ${}_s M_0 = {}_s Z \cdot {}_s \sigma_y$ 、 ${}_c A$ ：コンクリートの断面積、 ${}_s Z$ ：鋼管の断面係数、 ${}_c \sigma_B$ ：コンクリートの圧縮強度、 ${}_s \sigma_y$ ：鋼管の降伏強さ、である。図2に累加強度の概念図を示している。横軸 m と縦軸 n はそれぞれ無次元化曲げモーメントと無次元化軸力であり、無次元量は ${}_s M_0$ と CFT 断面の圧縮耐力 ($N_0 = 4({}_s D - t) \cdot t \cdot {}_s \sigma_y + {}_c D^2 \cdot {}_c \sigma_B$) である。コンクリートの耐力線 (図中 C) の原点を P 点に移動した部分と、鋼管の耐力線 (図中 S) の原点を Q 点に移動した部分により CFT の耐力が得られる。

(2) 降伏強度の算定

a) 応力-ひずみ関係

鋼管の応力 ${}_s \sigma$ - ひずみ ${}_s \varepsilon$ 関係は線形弾性とした (図3参照)。また、図3に示すように、コンクリートの応力 ${}_c \sigma$ - ひずみ ${}_c \varepsilon$ 関係は(2)式の放物線として仮定した (${}_c \sigma_B$ 、 ${}_c \varepsilon_m$ はそれぞれ圧縮強度とその時のひずみ。圧縮応力を正とする)。なお、引張りは負担しない。

$$(2) \quad \frac{{}_c \sigma}{{}_c \sigma_B} = 2 \frac{{}_c \varepsilon}{{}_c \varepsilon_m} - \left(\frac{{}_c \varepsilon}{{}_c \varepsilon_m} \right)^2$$

鋼管の最外縁が降伏強さ ${}_s \sigma_y$ (図3のC点)、あるいはコンクリートの圧縮側最外縁が圧縮強度 ${}_c \sigma_B$ の2/3 (図3のA点) になるときの曲げモーメント M - 軸力 N 相関関係を求める¹⁾。図4(a)、(b)にそれぞれ、中立軸が断面内で鋼管およびコンクリートが限界の状態になる時の応力分布を示している。コンクリートのように応力-ひずみ関係が非線形な材料においては「降伏」の定義が問題となるが、CFT 指針に従ったものである¹⁾。

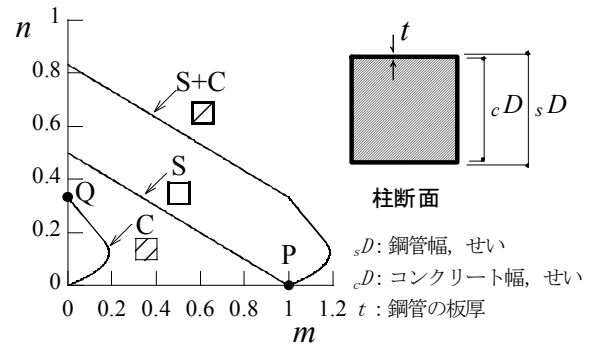


図2 単純累加強度

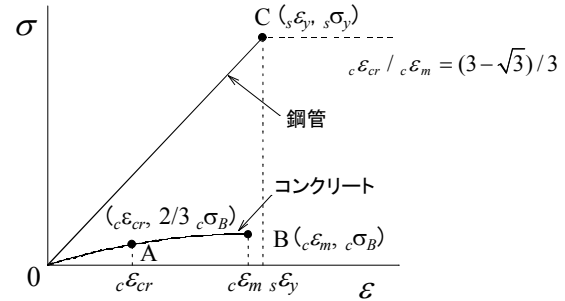


図3 応力-ひずみ関係

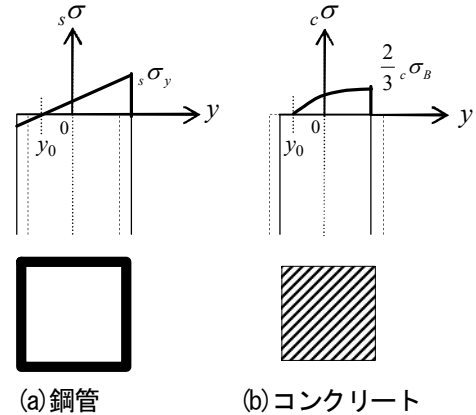


図4 限界の応力分布 (中立軸が断面内)

なお、コンクリートの圧縮強度の2/3のときのひずみ (限界ひずみ) と呼ぶ ${}_c \varepsilon_{cr}$ は(2)式より、 ${}_c \varepsilon_{cr} / {}_c \varepsilon_m = (3 - \sqrt{3}) / 3$ となる。

b) コンクリート部分の曲げモーメント ${}_c M$ と軸力 ${}_c N$

コンクリート部分の曲げモーメント ${}_c m = {}_c M / {}_c M_0$ (${}_c M_0 \equiv {}_c \sigma_B \cdot {}_c D^3$) と軸力 $n = {}_c N / {}_c N_0$ (${}_c N_0 \equiv {}_c \sigma_B \cdot {}_c D^2$) を、重心軸ひずみ ${}_c \varepsilon_0$ と曲率 ${}_c \varphi$ の関係で算定する (D はコンクリート部分のせいと幅である)。なお、重心軸ひずみ ${}_c \varepsilon_0$ と曲率 ${}_c \varphi$ は、(3)式、(4)式の無次元量 $\tilde{{}_c \varepsilon}_0$ 、 $\tilde{{}_c \varphi}$ で表現する。

$$\tilde{{}_c \varepsilon}_0 \equiv \frac{{}_c \varepsilon_0}{{}_c \varepsilon_m} \quad (3)$$

$$\tilde{{}_c \varphi} \equiv \frac{{}_c \varphi \cdot {}_c D}{{}_c \varepsilon_m} \quad (4)$$

図5のように座標軸を取ると、平面保持の仮定により

y の位置のひずみ ${}_c\varepsilon(y)$ は(5)式となる.

$${}_c\varepsilon(y) = {}_c\varepsilon_0 + y \cdot {}_c\varphi \quad (5)$$

中立軸が断面内の場合

軸力 ${}_cN$ は(6)式で算定できる. (6)式中の y_0 は中立軸位置であり, (5)式の左辺を 0 とおいて, (7)式となる (y_0 は図 4, 5 を参照) .

$$\begin{aligned} {}_cN &= \int_{y_0}^{\frac{cD}{2}} {}_c\sigma(y) \cdot {}_cD dy = \int_{y_0}^{\frac{cD}{2}} \left\{ 2 \frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} - \left(\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} \right)^2 \right\} {}_c\sigma_B \cdot {}_cD dy \\ &= {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^2 \left({}_c\varepsilon_0 + \frac{1}{4} {}_c\varphi - \frac{1}{2} {}_c\varepsilon_0^2 - \frac{1}{4} {}_c\varepsilon_0 \cdot {}_c\varphi \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{24} {}_c\varphi^2 + {}_c\varepsilon_0^2 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi} - \frac{1}{3} {}_c\varepsilon_0^3 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$y_0 = -\frac{{}_c\varepsilon_0}{{}_c\varphi} \quad (7)$$

無次元量を ${}_cN_0 (\equiv {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^2)$ とすると, 無次元化軸力 ${}_cn$ は(8)式となる.

$$\begin{aligned} {}_cn &= {}_c\varepsilon_0 + \frac{1}{4} {}_c\varphi - \frac{1}{2} {}_c\varepsilon_0^2 - \frac{1}{4} {}_c\varepsilon_0 \cdot {}_c\varphi \\ &\quad - \frac{1}{24} {}_c\varphi^2 + {}_c\varepsilon_0^2 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi} - \frac{1}{3} {}_c\varepsilon_0^3 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi} \end{aligned} \quad (8)$$

曲げモーメント ${}_cM$ は(9)式で算定できる.

$$\begin{aligned} {}_cM &= \int_{y_0}^{\frac{cD}{2}} {}_c\sigma(y) \cdot y \cdot {}_cD dy \\ &= \int_{y_0}^{\frac{cD}{2}} \left\{ 2 \frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} - \left(\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} \right)^2 \right\} {}_c\sigma_B \cdot y \cdot {}_cD dy \\ &= {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^3 \left(\frac{1}{4} {}_c\varepsilon_0 + \frac{1}{12} {}_c\varphi - \frac{1}{8} {}_c\varepsilon_0^2 - \frac{1}{12} {}_c\varepsilon_0 \cdot {}_c\varphi - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{64} {}_c\varphi^2 - \frac{1}{3} {}_c\varepsilon_0^3 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi} + \frac{1}{12} {}_c\varepsilon_0^4 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

無次元量を ${}_cM_0 (\equiv {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^3)$ とすると, 無次元化曲げモーメント ${}_cm$ は(10)式となる.

$$\begin{aligned} {}_cm &\equiv \frac{{}_cM}{{}_cM_0} \equiv \frac{{}_cM}{{}_c\sigma_B \cdot {}_cD^3} \\ &= \frac{1}{4} {}_c\varepsilon_0 + \frac{1}{12} {}_c\varphi - \frac{1}{8} {}_c\varepsilon_0^2 - \frac{1}{12} {}_c\varepsilon_0 \cdot {}_c\varphi \\ &\quad - \frac{1}{64} {}_c\varphi^2 - \frac{1}{3} {}_c\varepsilon_0^3 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi} + \frac{1}{12} {}_c\varepsilon_0^4 \cdot \frac{1}{{}_c\varphi^2} \end{aligned} \quad (10)$$

なお, (7)式より, 中立軸が断面内にある条件は, $-cD/2 \leq y_0 \leq cD/2$ より, $-1/2 \leq {}_c\varepsilon_0 / {}_c\varphi \leq 1/2$ となる.

中立軸が断面外の場合

軸力 ${}_cN$ は(11)式で算定できる.

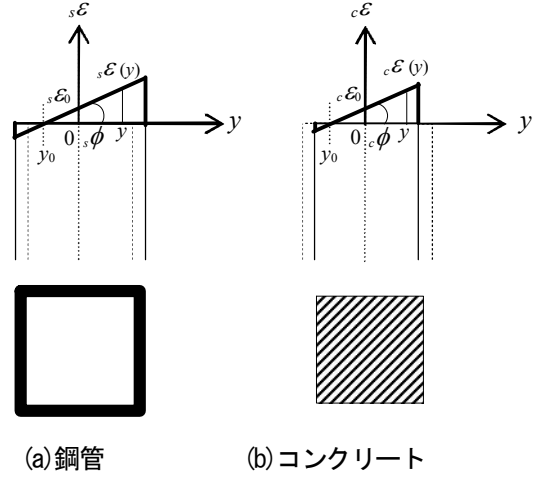


図 5 ひずみ分布

$$\begin{aligned} {}_cN &= \int_{-\frac{cD}{2}}^{\frac{cD}{2}} {}_c\sigma(y) \cdot {}_cD dy = \int_{-\frac{cD}{2}}^{\frac{cD}{2}} \left\{ 2 \frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} - \left(\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} \right)^2 \right\} {}_c\sigma_B \cdot {}_cD dy \\ &= 2 {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^2 \left({}_c\varepsilon_0 - \frac{1}{2} {}_c\varepsilon_0^2 - \frac{1}{24} {}_c\varphi^2 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

無次元化すると, 無次元化軸力 ${}_cn$ は(12)式となる.

$${}_cn \equiv \frac{{}_cN}{{}_cN_0} = 2 {}_c\varepsilon_0 - {}_c\varepsilon_0^2 - \frac{1}{12} {}_c\varphi^2 \quad (12)$$

曲げモーメント ${}_cM$ は(13)式で算定できる.

$$\begin{aligned} {}_cM &= \int_{-\frac{cD}{2}}^{\frac{cD}{2}} {}_c\sigma(y) \cdot y \cdot {}_cD dy \\ &= \int_{-\frac{cD}{2}}^{\frac{cD}{2}} \left\{ 2 \frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} - \left(\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} \right)^2 \right\} {}_c\sigma_B \cdot y \cdot {}_cD dy \\ &= \frac{1}{6} \cdot {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^3 \left({}_c\varphi - {}_c\varepsilon_0 \cdot {}_c\varphi \right) \end{aligned} \quad (13)$$

無次元化すると, 無次元化曲げモーメント ${}_cm$ は (14)式となる.

$${}_cm \equiv \frac{{}_cM}{{}_cM_0} \equiv \frac{{}_cM}{{}_c\sigma_B \cdot {}_cD^3} = \frac{1}{6} \left({}_c\varphi - {}_c\varepsilon_0 \cdot {}_c\varphi \right) \quad (14)$$

なお, (7)式より, 中立軸が断面外にある条件は $1/2 \leq {}_c\varepsilon_0 / {}_c\varphi$ となる.

c) 鋼管部分の曲げモーメント ${}_sM$ と軸力 ${}_sN$

鋼管部分の曲げモーメント ${}_sM$ ($\equiv {}_sM / {}_sM_y$) と軸力 ${}_sN$ ($\equiv {}_sN / {}_sN_y$) を, 重心軸ひずみ ${}_s\varepsilon_0$ と曲率 ${}_s\varphi$ の関係で算定する. 応力-ひずみ関係はヤング係数を ${}_sE$ とする線形弾性体とする.

図 5 のように座標を取る. y の位置のひずみ ${}_s\varepsilon(y)$ は(15)式となる.

$${}_s\varepsilon(y) = {}_s\varepsilon_0 + y \cdot {}_s\varphi \quad (15)$$

応力とひずみの関係は(16)式となる.

$${}_s\sigma(y) = {}_sE \cdot {}_s\varepsilon(y) = {}_sE \cdot ({}_s\varepsilon_0 + y \cdot {}_s\varphi) \quad (16)$$

圧縮力 ${}_sN$ は(17)式となる。 ${}_sA$ は鋼管の断面積である。

$$\begin{aligned} {}_sN &= \int_{{}_sA} {}_s\sigma(y) dA \\ &= \int_{{}_sA} {}_sE \cdot ({}_s\varepsilon_0 + y \cdot {}_s\varphi) dA = {}_sE \cdot {}_s\varepsilon_0 \cdot {}_sA \end{aligned} \quad (17)$$

曲げモーメントは(18)式となる。 右辺の ${}_sI$ は鋼管の断面2次モーメントである。

$${}_sM = \int_{{}_sA} {}_s\sigma(y) y dA = \int_{{}_sA} {}_sE \cdot ({}_s\varepsilon_0 + y \cdot {}_s\varphi) y dA = {}_sE \cdot {}_s\varphi \cdot {}_sI \quad (18)$$

以下、鋼管の軸力を ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ で表すと(19)式となる。

$${}_sN = {}_sE \cdot {}_s\varepsilon_0 \cdot {}_sA = {}_sE \cdot {}_sA \cdot \frac{{}_s\varepsilon_0}{{}_c\varepsilon_m} \cdot {}_c\tilde{\varepsilon}_0 \quad (19)$$

鋼管とコンクリートとが同じ変形をする場合は、 ${}_s\varepsilon_0 = {}_c\varepsilon_0$ であるので、 (20)式が得られる。

$${}_sN = {}_sE \cdot {}_sA \cdot {}_c\varepsilon_m \cdot {}_c\tilde{\varepsilon}_0 \quad (20)$$

曲げモーメントを ${}_c\tilde{\varphi}$ で表すと(21)式となる。

$${}_sM = {}_sE \cdot {}_s\varphi \cdot {}_sI = {}_sE \cdot {}_s\varphi \cdot {}_sI \cdot \frac{1}{{}_c\varphi \cdot {}_cD} \cdot {}_c\tilde{\varphi} \quad (21)$$

鋼管とコンクリートが同じ変形をする場合は、 ${}_s\varphi = {}_c\varphi$ なので、 (22)式が得られる。

$${}_sM = {}_sE \cdot {}_sI \cdot \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_cD} \cdot {}_c\tilde{\varphi} = {}_sM_y \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD} \cdot \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y} \cdot {}_c\tilde{\varphi} \quad (22)$$

軸力、曲げモーメントについて、無次元量を降伏軸力 ${}_sN_y (= {}_sA \cdot {}_s\sigma_y)$ 、降伏モーメント ${}_sM_y$ とすると(23)式、(24)式の無次元化軸力 ${}_sn$ 、無次元化曲げモーメント ${}_sm$ が得られる。

$${}_sn \equiv \frac{{}_sN}{{}_sN_y} \equiv \frac{{}_sN}{{}_sA \cdot {}_s\sigma_y} = \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y} \cdot {}_c\tilde{\varepsilon}_0 \quad (23)$$

$${}_sm \equiv \frac{{}_sM}{{}_sM_y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD} \cdot \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y} \cdot {}_c\tilde{\varphi} \quad (24)$$

d) 降伏条件と適用範囲

コンクリートのひずみが ${}_c\varepsilon_{cr}$ となる時

圧縮側のひずみが限界ひずみになるとして、すなわち ${}_c\varepsilon_{cr} = (3 - \sqrt{3}) {}_c\varepsilon_m / 3$ として(25)式が得られる。

$${}_c\varepsilon\left(\frac{{}_cD}{2}\right) = {}_c\varepsilon_0 + \frac{{}_cD}{2} {}_c\varphi = {}_c\varepsilon_{cr} = \frac{3 - \sqrt{3}}{3} {}_c\varepsilon_m \quad (25)$$

無次元量 ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ 、 ${}_c\tilde{\varphi}$ で表現すると(26)式となる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} = \frac{3 - \sqrt{3}}{3} \quad (26)$$

上式より、 ${}_c\tilde{\varphi}$ は(27)式で得られる。

$${}_c\tilde{\varphi} = \frac{3 - \sqrt{3}}{3} \cdot \frac{1}{\frac{{}_c\tilde{\varepsilon}_0}{{}_c\tilde{\varphi}} + \frac{1}{2}} \quad (27)$$

ただし、算定したときに、鋼管の最外縁が鋼管の降伏ひずみになっていないことの確認が必要である。この条件は(28)式となる。

$$\begin{cases} {}_s\varepsilon_0 + \frac{{}_sD}{2} {}_s\varphi \leq {}_s\varepsilon_y \\ {}_s\varepsilon_0 - \frac{{}_sD}{2} {}_s\varphi \geq -{}_s\varepsilon_y \end{cases} \quad (28)$$

無次元量 ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ 、 ${}_c\tilde{\varphi}$ で表現すると下式となる。なお、 ${}_s\varepsilon_0 = {}_c\varepsilon_0$ 、 ${}_s\varphi = {}_c\varphi$ としている。

$$\begin{cases} {}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD} \leq \frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \\ {}_c\tilde{\varepsilon}_0 - \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD} \geq -\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \end{cases} \quad (29)$$

鋼管の引張側ひずみが ${}_s\varepsilon_y$ となる時

引張側のひずみが降伏ひずみになるとして、(30)式が得られる。

$${}_s\varepsilon\left(-\frac{{}_sD}{2}\right) = {}_s\varepsilon_0 - \frac{{}_sD}{2} {}_s\varphi = -{}_s\varepsilon_y \quad (30)$$

したがって、(31)式が得られる。

$$\frac{{}_s\varepsilon_0}{{}_c\varepsilon_m} - \frac{{}_sD}{2} \frac{{}_s\varphi}{{}_c\varepsilon_m} = -\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \quad (31)$$

鋼管とコンクリートが同じ挙動をするとして、(32)式が得られる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 - \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD} = -\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \quad (32)$$

上式より、 ${}_c\tilde{\varphi}$ は(33)式で得られる。

$${}_c\tilde{\varphi} = -\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \cdot \frac{1}{\frac{{}_c\tilde{\varepsilon}_0}{{}_c\tilde{\varphi}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD}} \quad (33)$$

コンクリートの圧縮側最外縁ひずみが ${}_c\varepsilon_{cr}$ 以下であることより、(26)式を参照して、(34)式が得られる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \leq \frac{3 - \sqrt{3}}{3} \quad (34)$$

また、鋼管の圧縮側最外縁のひずみが ${}_s\varepsilon_y$ 以下であることより、下式が得られる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \cdot \frac{{}_sD}{{}_cD} \leq \frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \quad \text{再掲(29)の上式}$$

鋼管の圧縮側ひずみが ${}_s\varepsilon_y$ となる時

圧縮側のひずみが降伏ひずみになるとして、(35)式が得られる。

$${}_s\varepsilon\left(\frac{sD}{2}\right) = {}_s\varepsilon_0 + \frac{sD}{2} {}_s\varphi = {}_s\varepsilon_y \quad (35)$$

したがって、(36)式が得られる。

$$\frac{{}_s\varepsilon_0}{{}_c\varepsilon_m} + \frac{sD}{2} \frac{{}_s\varphi}{{}_c\varepsilon_m} = \frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \quad (36)$$

鋼管とコンクリートが同じ挙動をするとして、(37)式が得られる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \cdot \frac{sD}{{}_cD} = \frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \quad (37)$$

上式より、 ${}_c\tilde{\varphi}$ は(38)式で得られる。

$${}_c\tilde{\varphi} = \frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \cdot \frac{1}{\frac{{}_c\tilde{\varepsilon}_0}{{}_c\tilde{\varphi}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{sD}{{}_cD}} \quad (38)$$

コンクリートの圧縮側最外縁ひずみが ${}_c\varepsilon_{cr}$ 以下であることより、下式が得られる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \leq \frac{3-\sqrt{3}}{3} \quad \text{再掲(34)}$$

また、鋼管の引張側最外縁のひずみが $-{}_s\varepsilon_y$ より大きいことより、下式が得られる。

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 - \frac{1}{2} {}_c\tilde{\varphi} \cdot \frac{sD}{{}_cD} \geq -\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m} \quad \text{再掲(29)の下式}$$

e) $m-n$ 相関関係の算定

断面寸法や材料強度を設定し、 ${}_c\tilde{\varepsilon}_0 / {}_c\tilde{\varphi}$ の値を与え、(27)、(33)、(38)式を用いて ${}_c\tilde{\varphi}$ を求める。次に ${}_c\tilde{\varphi}$ に与えた ${}_c\tilde{\varepsilon}_0 / {}_c\tilde{\varphi}$ を乗じることにより、 ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ が求まる。(29)、(34)式の適用範囲より、用いるべき ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ と ${}_c\tilde{\varphi}$ の値が判明する。これらの曲率、重心軸のひずみと鉄骨のそれらが等しいと置いて、軸力、曲げモーメントを(8)、(10)式（あるいは(12)、(14)式）、(23)、(24)式より算定する。

中立軸位置がコンクリート部分の最外縁となる ${}_c\tilde{\varepsilon}_0 / {}_c\tilde{\varphi} = -0.5$ より、 ${}_c\tilde{\varepsilon}_0 / {}_c\tilde{\varphi}$ を順次増やして上記計算を行なうことにより、 $m-n$ 相関関係が求まる。

(3) 解析パラメータ

2.2 節の諸式より、 $m-n$ 相関関係に影響を及ぼす因子は、材料強度、鋼管幅厚比、材料の強度時のひずみであることが分かる。

したがって、解析パラメータとして、角形鋼管の幅厚比、鋼管の降伏強度、コンクリートの圧縮強度、コンクリートの圧縮強度時のひずみを選び、下記のように与えた。なお、鋼管の降伏強度に関しては、CFT 指針¹⁾

(2008 年版) で新しく適用範囲となった SA440 鋼材と、近年、研究の行なわれている建築構造用高強度鋼材 H-SA700 を念頭におき、降伏強度 440N/mm² と 700N/mm² も解析パラメータとして選んだ。

- 1) 角形鋼管の幅厚比 sD/t (15, 20, 30, 40, 50, 60, 70)
- 2) 角形鋼管の降伏強度 ${}_s\sigma_y$ (235, 295, 325, 440, 700 N/mm²)
- 3) コンクリートの圧縮強度 (24, 36, 48, 60N/mm²)
- 4) コンクリートの圧縮強度時のひずみ (0.2%, 0.25%)

図 6 に鋼管とコンクリート（圧縮強度時のひずみが 0.2% の場合）の応力-ひずみ関係を示す。

図 7 に鋼管の降伏ひずみ ${}_s\varepsilon_y$ と、コンクリートの限界ひずみ ${}_c\varepsilon_{cr}$ の関係を示す。計算する組合せにおいて、常に ${}_c\varepsilon_{cr} < {}_s\varepsilon_y$ のことがわかる。

3. 解析結果と考察

(1) 圧縮強度

圧縮力だけを受ける場合の圧縮耐力に関して、累加強度 N_{sp} と降伏強度 N_y は、それぞれ(39)式、(40)式で得られる

$$N_{sup} = \frac{2}{3} {}_c\sigma_B \cdot {}_cA + {}_s\sigma_y \cdot {}_sA \quad (39)$$

$$N_y = \frac{2}{3} {}_c\sigma_B \cdot {}_cA + {}_sE \cdot {}_c\varepsilon_{cr} \cdot {}_sA \quad (40)$$

(39)式、(40)式より、 N_{sp}/N_y を幅厚比や材料強度で表現すると、(41)式が得られる。

$$\frac{N_{sup}}{N_y} = \frac{\frac{{}_c\sigma_B}{{}_s\sigma_y} \left(\frac{sD}{t} - 2\right)^2 + 6\left(\frac{sD}{t} - 1\right)}{\frac{{}_c\sigma_B}{{}_s\sigma_y} \left(\frac{sD}{t} - 2\right)^2 + 6\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y} \left(\frac{sD}{t} - 1\right)} \quad (41)$$

また、降伏強度 N_y が、鋼管のみの圧縮強度 ${}_s\sigma_y \cdot {}_sA$ より小さい条件は(42)式で与えられる。

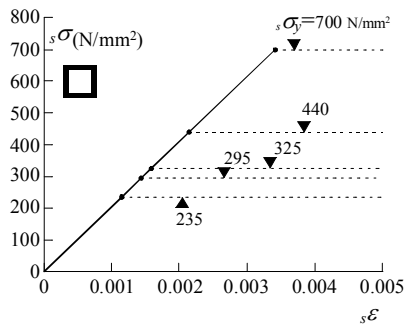
$$\frac{1}{6} \frac{{}_c\sigma_B}{{}_s\sigma_y} \cdot \frac{\left(\frac{sD}{t} - 2\right)^2}{\left(\frac{sD}{t} - 1\right)} + \frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y} < 1 \quad (42)$$

図 8 に、 N_{sp}/N_y と角形鋼管幅厚比 sD/t の関係を示す。図より、鋼管の強度が高いほど、またコンクリートの強度が低いほど N_{sp}/N_y の値は大きくなることがわかる。

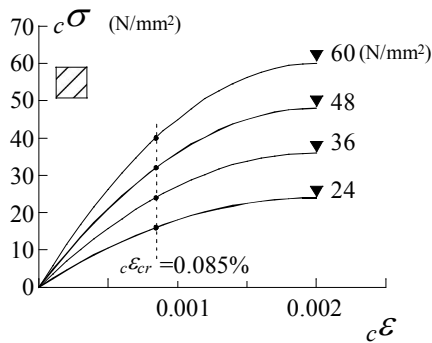
(2) 曲げ強度

図 9-12 に累加強度と降伏強度の比較を $m-n$ 相関関係上で示す。曲げモーメントは鋼管の降伏曲げモーメント ${}_sM_0$ で、軸力は CFT 断面の圧縮耐力 N_0 で無次元化している。

図中 S+C は累加強度、降伏強度は 2.2 節で算定方法を示した降伏強度である。また、図中の C、S はそれぞれ、コンクリート断面、鋼管断面の短期許容耐力である。終局強度は、コンクリートおよび鋼管がそれぞれ ${}_c\sigma_B$ 、 ${}_s\sigma_y$ で長方形分布の応力となっているとして算定した終局耐力である。



(a) 鋼管



(b) コンクリート

図6 解析を行なった応力-ひずみ関係

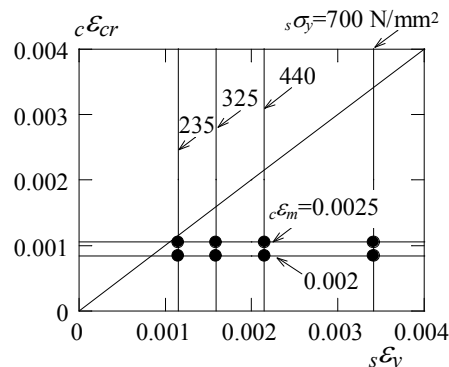


図7 鋼管の降伏ひずみとコンクリートの限界ひずみ

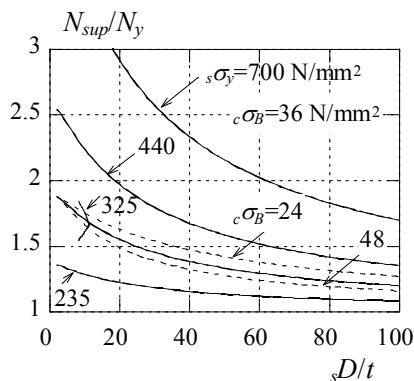


図8 圧縮強度の比較

以下、紙面の関係で解析パラメータのうち、幾つかの場合の結果を例示する。

a) 幅厚比の影響

鋼管の降伏強度 $s\sigma_y$ は 325N/mm^2 、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ は 36N/mm^2 、 60N/mm^2 、コンクリートの圧壊時のひずみは 0.2% で、幅厚比 D/t が $20, 30, 40$ の場合の $m-n$ 相関関係を、図 9(a)-(c), (e)-(g) に示す。図(d)と(h)は、同じ軸力における「(累加強度-降伏強度)/降伏強度」の値を ε と定義し、横軸にとった。

図より、累加強度は降伏強度より大きな値を与えていることがわかる。また、降伏強度は鋼管のみの短期許容耐力より小さくなる場合がある(図(a))。軸力比が大きくなるにつれて、累加強度と降伏強度の差は大きくなり、同じ軸力比では、幅厚比が小さくなるにつれて、両者の差が大きくなることが観察される(図(d), (h))。

b) 角形鋼管の降伏強度の影響

幅厚比 D/t は 20 、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ は 36N/mm^2 、 60N/mm^2 、コンクリートの圧壊時のひずみは 0.2% で、鋼管の降伏強度 $s\sigma_y$ が 235N/mm^2 、 325N/mm^2 、 440N/mm^2 の場合の $m-n$ 相関関係を、図 10(a)-(c), (e)-(g) に示す。

鋼管の強度が大きくなるほど累加強度と降伏強度の差は大きいことが観察される。この理由は、本例の場合はコンクリートはひずみが 0.085% で限界となるが、その時の鋼管は、強度の高い鋼管ほど降伏強度のレベルに比較して小さい応力を負担していることによる。

c) コンクリートの圧縮強度の影響

幅厚比 D/t は $20, 40$ 、鋼管の降伏強度 $s\sigma_y$ は 325N/mm^2 、コンクリートの圧壊時のひずみは 0.2% で、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ が 36N/mm^2 、 48N/mm^2 、 60N/mm^2 の場合の $m-n$ 相関関係を、図 11(a)-(c), (e)-(g) に示す。

図よりコンクリート強度が大きくなるほど、累加強度と降伏強度の差が小さくなることをわかる。

d) コンクリートの圧縮強度時のひずみの影響

幅厚比 D/t は 20 、鋼管の降伏強度 $s\sigma_y$ は 325N/mm^2 、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ は 36N/mm^2 、 60N/mm^2 で、コンクリートの圧壊時のひずみが 0.2% 、 0.25% の場合の $m-n$ 相関関係を、図 12 に示す。図より、コンクリートの圧壊時のひずみが大きくなるほど、累加強度と降伏強度の差が小さくなることをわかる。

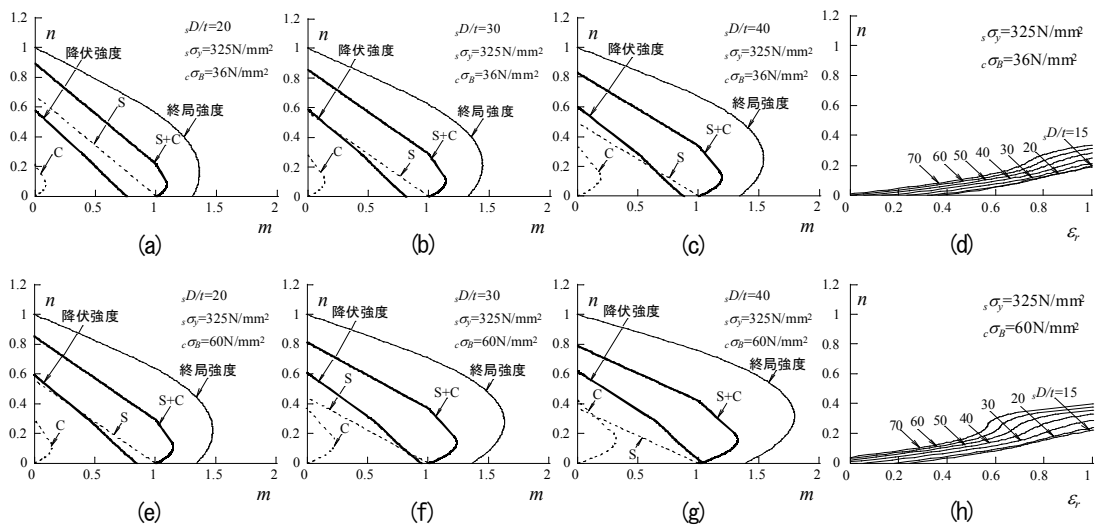


図9 幅厚比の影響

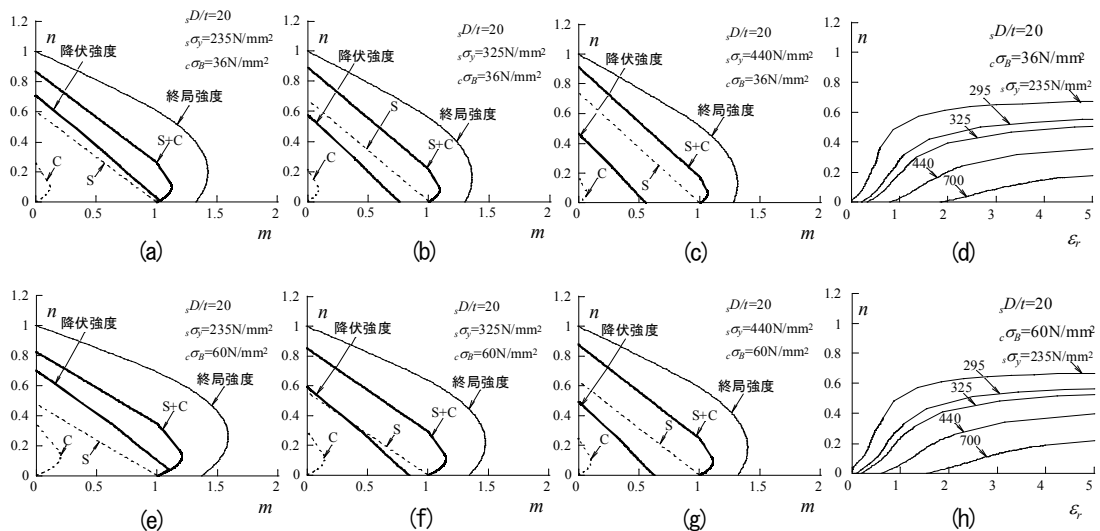


図10 鋼管の降伏強さの影響

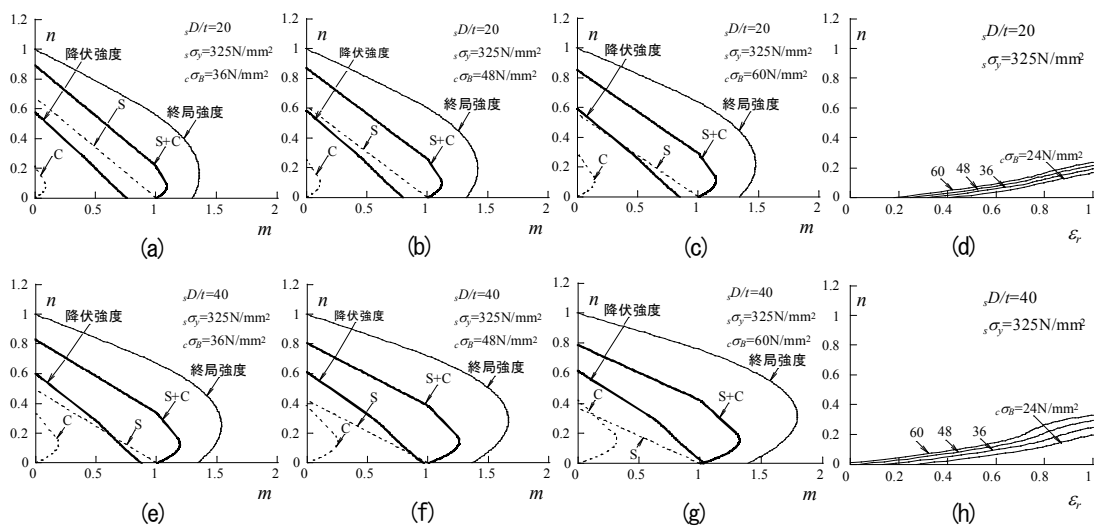


図11 コンクリートの圧縮強度の影響

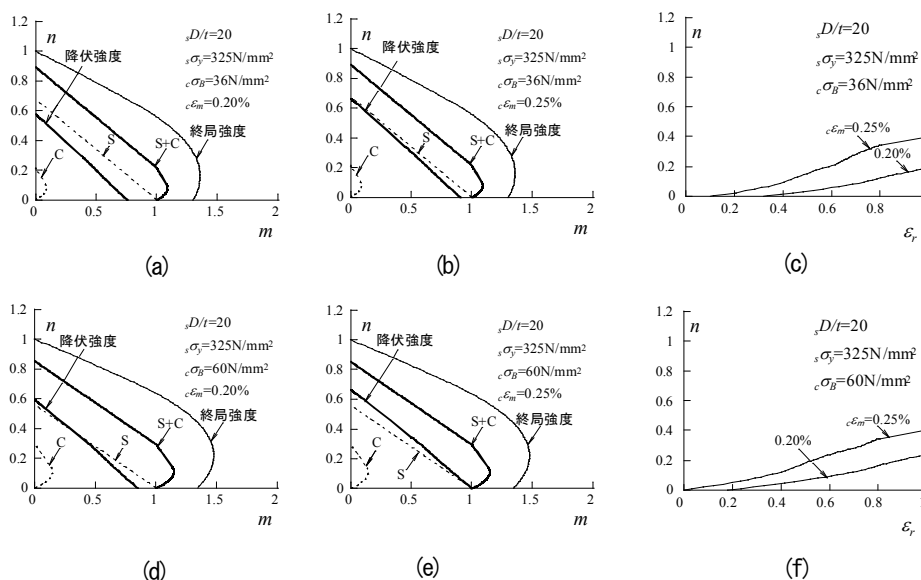


図 12 コンクリートの圧縮強度時のひずみの影響

4. むすび

軸力と曲げを受けるコンクリート充填角形鋼管柱の降伏強度と累加強度の関係を、角形鋼管の幅厚比、降伏強さ、コンクリートの圧縮強度、コンクリートの圧縮強度時のひずみを変数として計算した。その結果、鋼管の降伏強さが大きいとき、幅厚比が小さいとき、コンクリート強度が小さいとき、コンクリートの圧壊時のひずみが小さいとき、累加強度と降伏強度に大きな違いが出ることが分かった。

今後、高強度のコンクリートまで適用できる応力-ひずみ関係式を用いて、検討を進める予定である。また、変形（曲率）を含めて累加強度と降伏強度の関係を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008.10.
- 2) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準，2001.3.

STUDY ON RELATION BETWEEN SUPERPOSED STRENGTH AND YIELD STRENGTH OF CFT COLUMNS

Keigo TSUDA, Masae KIDO and Liu Qing Song

ABSTRACT Flexural strength of a short CFT column can be obtained by superposed strength method when material strengths and the width-thickness-ratio are generally used ones. The ultimate loads have been well discussed by comparing with the analytical values and experimental results. However the relation between the yield strength and the superposed strength has not been discussed.

The purpose of this paper is to calculate the superposed strength and the yield strength of CFT columns and to discuss the relation of both strengths. According to the results, the superposed strength and the yield strength are different when the yield strength of steel is large and the width-thickness ratio, the compressive strength and the strain at a compressive strength are small.