(10) コンクリート充填角形鋼管断面の単純累加強度時のひずみ分布について

劉　懋 [1]・西村　拓真 [2]・城戸　將江 [3]

[1] 正会員　福岡大学　工学部建築学科　助教（〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈八丁目 19 番 1 号）
E-mail: liu@fukuoka-u.ac.jp

[2] 正会員　北九州市立大学大学院　国際環境工学研究科（〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1）
E-mail: d2mbb013@eng.kitakyu-u.ac.jp

[3] 正会員　北九州市立大学　国際環境工学部　教授（〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1）
E-mail: kido-m@kitakyu-u.ac.jp

本研究では，角形 CFT 柱を対象とし，単純累加強度で求めた短期許容曲げ耐力になるときの重心軸ひずみと曲率を平面保持の仮定に基づき数値計算にて求め，単純累加強度時の断面のひずみの状況を示した．解析変数を，コンクリート，鋼管の強度とし，コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみとそれぞれの材料の許容応力度時のひずみの比較を行った．コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ と鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ は，CFT 指針の適用範囲である ${}_c\sigma_B$=36，60，90N/mm^2，${}_s\sigma_y$=235，325，385，440N/mm^2 と，適用範囲外となる ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2，${}_s\sigma_y$=700N/mm^2 を組み合わせて解析を行い，コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみ ε_{edge} とそれぞれの材料の許容応力度時のひずみ ε_a の比 $\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$ と軸力比 n の関係を示し，解析変数との関係について考察した．

Key Words: *Steel-concrete composite structures, Simple superposed strength, Strain distribution, Allowable strength for short-term loading, Navier's hypothesis*

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）では，軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管短柱の曲げ耐力は，コンクリートや鋼管の強度，幅厚比がCFT指針の適用範囲内であれば累加強度で計算できるとしている．CFT 指針では降伏曲げ耐力は，「短柱の降伏曲げ耐力は，断面を構成する材料の応力ーひずみ関係式を用い，平面保持の仮定に基づいて計算された曲げモーメントー曲率関係において，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」として，CFT 指針の第 2 編において，鋼管とコンクリートの許容耐力を単純累加した耐力式によって算定することとなっている．

このような背景から，単純累加強度と降伏強度に関する研究がなされてきた [2),3)]．文献 2)，3)では，コンクリートおよび鋼管の応力ーひずみ関係を設定し，平面保持の仮定に基づき，断面の一部が許容応力度に達したときの曲げ耐力（降伏強度）を算定し，単純累加強度と降伏強度の比較を行い，角形鋼管の幅厚比，降伏応力度，コンクリートの圧縮強度の影響を明らかにしている．これらの文献によれば，鋼管の降伏応力度が大きいとき，幅厚比が小さいとき，コンクリートの圧縮強度が小さいときに，単純累加強度と降伏強度に大きな違いが出る．また，断面の一部が降伏と判定されたとき，例えば短期の許容応力度に達したときのCFT柱の降伏強度が，鋼管のみの降伏強度よりも小さくなる場合もあり，CFT 柱の短期許容耐力として降伏強度を用いることは，安全側過ぎる評価となり，構造性能に優れているCFT柱の利点を生かしきれないこともあると考えられる．

一方で，単純累加強度時に断面のひずみ分布がどのようになっているのかは不明である．降伏強度はほとんどの場合で単純累加強度よりも小さく [2),3)]，単純累加強度時はコンクリートのひずみが短期許容応力度時のひずみを超えている，鋼管の最外縁以外の部分においても短期許容応力度時のひずみを超えている範囲があることが想定される．

本研究は，角形CFT柱を対象とし，単純累加強度と等しくなるときの重心軸ひずみと曲率を平面保持の仮定に基づき算定し，単純累加強度時の断面のひずみの状況を明らかにすることを目的とする．解析変数を，コンクリート，鋼管の強度とし，コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみとそれぞれの材料の許容応力度時のひずみの比較を行う．CFT 指針の適用範囲内，適用範囲外の材料強度の組合せに対し，単純累加強度時の断面のひずみの値と解析変数の関係について明らかにする．

2. 解析

(1) 問題の設定

本研究では，角形CFT柱を対象とし，単純累加強度で求めた短期許容曲げ耐力になるときの重心軸ひずみと曲率を平面保持の仮定に基づき算定することを問題とする．軸力は圧縮力のみの場合について検討する．図–1 に示すように断面せい，幅を D とし，鋼管の板厚を t とする．

(2) 単純累加強度

CFT 指針第 2 編 [1]では，軸方向力を受ける部材および軸力と曲げを受ける柱材の短期許容耐力の算定式が示されている．軸方向力を受ける短柱の許容耐力は，式(1)により算定する．

$$N_{ca1} = {}_cN_c + {}_sN_c \quad (1)$$

ここで，${}_cN_c$，${}_sN_c$はそれぞれ式(2)，(3)で定義される．

$${}_cN_c = {}_cA \cdot f_c = {}_cA \cdot \frac{2}{3}\,{}_c\sigma_B \quad (2)$$

$${}_sN_c = {}_sA \cdot {}_sf_t = {}_sA \cdot {}_s\sigma_y \quad (3)$$

式中の${}_cA$，${}_sA$はそれぞれコンクリート部分，鋼管の断面積，f_cはコンクリートの短期許容圧縮応力度で本研究では$2/3\,{}_c\sigma_B$（${}_c\sigma_B$はコンクリートの圧縮強度），${}_sf_t$は鋼管の短期許容応力度で本研究では鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ である．ただし，コンクリートと鋼管の降伏ひずみが著しく異なる場合には，式(2)，(3)を用いて許容耐力の算定を行うと，その耐力時にどちらかが弾性範囲を超えることが考えられるため，そのような場合は，式(4)，(5)を用いて両者を弾性にとどめるように設計することが解説に記されている．

$${}_cN_c = {}_cA \cdot {}_cE \cdot \varepsilon_a \quad (4)$$

$${}_sN_c = {}_sA \cdot {}_sE \cdot \varepsilon_a \quad (5)$$

ここに，

$$\varepsilon_a = \min\left(\frac{f_c}{{}_cE}, \frac{{}_sf_t}{{}_sE}\right) \quad (6)$$

式中の${}_cE$，${}_sE$はそれぞれコンクリートおよび鋼管のヤング係数である．

次に，軸力と曲げを受ける部材の許容耐力は，式(7)，式(8)で表現される単純累加強度式によって算定することになっている．

$0 \le N \le {}_cN_c$ の時

$$\left.\begin{aligned} N &= {}_cN \\ M_a &= {}_sM_0 + {}_cM \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

$N > {}_cN_c$ の時

$$\left.\begin{aligned} N &= {}_cN_c + {}_sN \\ M_a &= {}_sM \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

ここで，${}_cN$，${}_cM$ 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，${}_sN$，${}_sM$ 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．式中の，${}_cN_c$，${}_sM_0$はそれぞれ式(2)，式(9)で定義される．

$${}_cN_c = {}_cA \cdot f_c = {}_cA \cdot \frac{2}{3}\,{}_c\sigma_B \quad (2)\text{再掲}$$

$${}_sM_0 = {}_sZ \cdot {}_sf_t = {}_sZ \cdot {}_s\sigma_y \quad (9)$$

式(9)中の ${}_sZ$ は鋼管の断面係数である．図–2 に単純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，${}_sM_0$ と CFT 断面の圧縮耐力 N_0（$= 4(D-t)\cdot t \cdot {}_s\sigma_y + {}_cD^2 \cdot {}_c\sigma_B$，${}_cD$：コンクリート部分のせいと幅）で無次元化している．

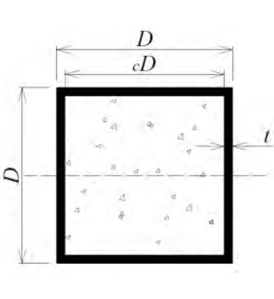


図-1　CFT 柱断面

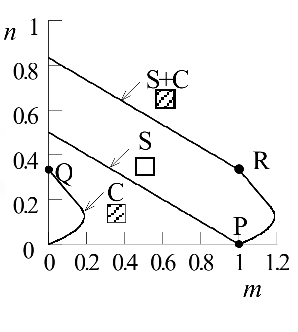


図-2　単純累加強度

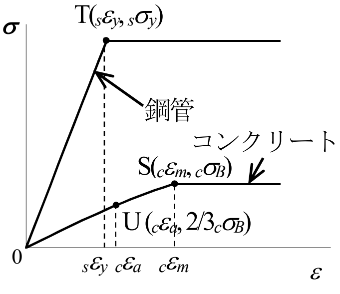
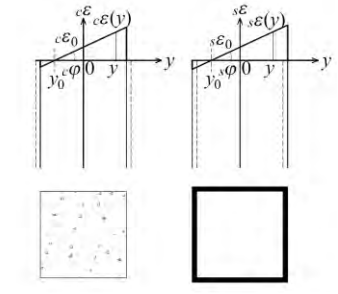


図-3　応力―ひずみ関係



(a) コンクリート　(b) 鋼管

図-4　ひずみ分布

コンクリートの耐力線（図中 C）の原点を横軸に沿って P 点に移動した低軸力域をあらわす部分と，鋼管の耐力線（図中 S）の原点を縦軸上に移動した高軸力域の部分によって得られる．

(3) 平面保持の仮定に基づく *m–n* 相関関係の算定

a) 応力ーひずみ関係

コンクリートの応力 $_c\sigma$−ひずみ $_c\varepsilon$ 関係は式(10)の Fafitis&Shah 式[4]を用いた（$_c\sigma_B$, $_c\varepsilon_m$はそれぞれ圧縮強度とその時のひずみで，圧縮応力を正とする）．なお，コンクリートのひずみ $_c\varepsilon$が圧縮強度時のひずみ $_c\varepsilon_m$ に達した後は一定応力 $_c\sigma_B$とした．また，引張は負担しない．

$$\left.\begin{array}{l} {}_c\varepsilon \le {}_c\varepsilon_m \text{の時,}\quad {}_c\sigma = \left\{1-\left(1-\dfrac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m}\right)^a\right\}{}_c\sigma_B \\ {}_c\varepsilon > {}_c\varepsilon_m \text{の時,}\quad {}_c\sigma = {}_c\sigma_B \end{array}\right\} \quad (10)$$

式(10)中の $_c\varepsilon_m$ および a は下式を用いる．式(12)中のヤング係数 $_cE$ は式(13)で与えられる．

$$ {}_c\varepsilon_m = 0.93 \times {}_c\sigma_B^{1/4} \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$ a = \frac{{}_cE \cdot {}_c\varepsilon_m}{{}_c\sigma_B} \quad (12)$$

$$ {}_cE = \left(3.32 \times \sqrt{{}_c\sigma_B} + 6.9\right) \times 10^3 \quad (13)$$

なお，圧縮強度時のひずみ $_c\varepsilon_m$およびヤング係数 $_cE$ は，崎野−孫モデル[5]で採用される Popovics[6]，Martinez[7]の提案によるものである．鋼管の応力 $_s\sigma$−ひずみ $_s\varepsilon$関係は完全弾塑性型とした．図−3 にコンクリートおよび鋼管の応力ーひずみ関係の例を示す．

b) コンクリート部分および鋼管部分の曲げモーメントと軸力

図−4 に示すように座標軸を取ると，平面保持の仮定によりコンクリートおよび鋼管の y の位置のひずみ $_c\varepsilon(y)$, $_s\varepsilon(y)$は式(14)となる．

$$ {}_s\varepsilon(y) = {}_c\varepsilon(y) = {}_c\varepsilon_0 + y \cdot {}_c\varphi \quad (14)$$

コンクリートと鋼管の重心軸ひずみ $_c\varepsilon_0$, $_s\varepsilon_0$ ならびに曲率 $_c\varphi$, $_s\varphi$は平面保持の仮定のもとでは等しくなるので，以後は $_s\varepsilon_0$, $_s\varphi$を $_c\varepsilon_0$, $_c\varphi$としてあらわす．また，重心軸ひずみ $_c\varepsilon_0$ および曲率 $_c\varphi$は式(15)，式(16)の無次元量であらわす．

$$ {}_c\tilde{\varepsilon}_0 = {}_c\varepsilon_0 / {}_c\varepsilon_m \quad (15)$$

$$ {}_c\tilde{\varphi} = {}_c\varphi \cdot {}_cD / {}_c\varepsilon_m \quad (16)$$

ひずみ分布がわかれば，コンクリートおよび鋼管の応力 $_c\sigma(y)$, $_s\sigma(y)$が a) 項で仮定した応力ーひずみ関係から算定でき，コンクリート部分および鋼管部分の軸力と曲げモーメント $_cN$, $_cM$, $_sN$, $_sM$, が断面力の定義に従い，式(17)，式(18)のように算定できる．

$$ \text{コンクリート部分：}\left.\begin{array}{l} {}_cN = \int_A {}_c\sigma(y)\ dA \\ {}_cM = \int_A {}_c\sigma(y) \cdot y dA \end{array}\right\} \quad (17)$$

$$ \text{鋼管部分：}\left.\begin{array}{l} {}_sN = \int_A {}_s\sigma(y)\ dA \\ {}_sM = \int_A {}_s\sigma(y) \cdot y dA \end{array}\right\} \quad (18)$$

CFT 柱の許容耐力は，式(17)，式(18)の $_cN$ と $_sN$, $_cM$ と $_sM$ を累加することで式(19)のように求めることができる．

$$\left.\begin{array}{l} {}_{cft}N = {}_cN + {}_sN \\ {}_{cft}M = {}_cM + {}_sM \end{array}\right\} \quad (19)$$

本研究では，式(19)の $_{cft}N$, $_{cft}M$ がそれぞれ(2)節で示した短期許容耐力 N, M_aと等しくなる時の，重心軸ひずみ $_c\tilde{\varepsilon}_0$ および曲率 $_c\tilde{\varphi}$ を求めることが問題となるが，$_{cft}N=N$, $_{cft}M=M_a$ は $_c\tilde{\varepsilon}_0$，$_c\tilde{\varphi}$ に関する非線形連立方程式となるため数値解析により $_c\tilde{\varepsilon}_0$，$_c\tilde{\varphi}$ を求めた．具体的な計算方

表−1 想定されるコンクリートのひずみ分布の条件

ケース	ひずみが $_c\varepsilon_m$ 以上の部位		中立軸位置
	引張縁	圧縮縁	
C①	×	×	断面内
C②	×	○	断面内
C③	×	×	断面外
C④	×	○	断面外
C⑤	○	○	断面外

○印は当該箇所のひずみが $_c\varepsilon_m$以上となっていることをあらわす．×印はその逆である．

表−2 想定される鋼管のひずみ分布の条件

ケース	ひずみが $_s\varepsilon_y$ 以上（$-{}_s\varepsilon_y$ 以下）の部位				中立軸位置
	引張側フランジ	引張側ウェブ	圧縮側ウェブ	圧縮側フランジ	
S①	×	×	×	×	断面内／外
S②	○	×	×	×	断面内
S③	○	○	×	×	断面内
S④	○	○	×	○	断面内
S⑤	○	○	○	○	断面内
S⑥	○	×	×	○	断面内
S⑦	×	×	×	○	断面内／外
S⑧	×	×	○	○	断面内／外
S⑨	○	×	○	○	断面内
S⑩	○*1	○*1	○	○	断面外

○印は当該箇所のひずみが圧縮側で $_s\varepsilon_y$ 以上，引張側で $-{}_s\varepsilon_y$ 以下となっていることをあらわす．×印はその逆である．
*1 ひずみは圧縮側であることを示す．

法は次のとおりである．

1) 表−1，表−2 に示す，想定されるひずみ分布（コンクリートの場合は 5 ケース，鋼管の場合は 10 ケース）に対応する応力分布を ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$，${}_c\tilde{\varphi}$ を用いて表現する．
2) それぞれのケースに対して 1)の応力分布を用い軸力と曲げモーメントを式(17)〜(19)で算定し，(N, M_a)と$({}_{cft}N,\ {}_{cft}M)$が等しくなる時の ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$，${}_c\tilde{\varphi}$ を収束計算にて求める．
3) 2)で求めた ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$，${}_c\tilde{\varphi}$ の値を式(14)〜(16)に代入し，鋼管の最外縁およびフランジとウェブの境界，コンクリートの最外縁のひずみが想定したひずみ分布に適合していれば正しい ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$，${}_c\tilde{\varphi}$ とする．

また，軸力のみが作用する場合，${}_{cft}N$は ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ のみの関数として式(20)〜(22)のようにあらわされる．

i) ${}_c\varepsilon < {}_c\varepsilon_m$かつ ${}_s\varepsilon < {}_c\varepsilon_y$の場合（ケースC③，ケースS①）

$$
\begin{aligned}
{}_{cft}N &= {}_cN + {}_sN \\
&= \left\{1-\left(1-{}_c\tilde{\varepsilon}_0\right)^a\right\}{}_c\sigma_B \cdot {}_cA + {}_c\tilde{\varepsilon}_0 \cdot \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y} \cdot {}_s\sigma_y \cdot {}_sA
\end{aligned} \tag{20}
$$

ii) ${}_c\varepsilon \geqq {}_c\varepsilon_m$かつ ${}_s\varepsilon < {}_c\varepsilon_y$の場合（ケースC⑤，ケースS①）

$$
{}_{cft}N = {}_c\sigma_B \cdot {}_cA + {}_c\tilde{\varepsilon}_0 \cdot \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y} \cdot {}_s\sigma_y \cdot {}_sA \tag{21}
$$

iii) ${}_c\varepsilon < {}_c\varepsilon_m$かつ ${}_s\varepsilon \geqq {}_c\varepsilon_y$の場合（ケースC③，ケースS⑩）

$$
{}_{cft}N = \left\{1-\left(1-{}_c\tilde{\varepsilon}_0\right)^a\right\}{}_c\sigma_B \cdot {}_cA + {}_s\sigma_y \cdot {}_sA \tag{22}
$$

計算で得られた ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$，${}_c\tilde{\varphi}$ を用いて，コンクリート圧縮縁，鋼管の引張縁，圧縮縁のひずみを式(14)で算定し，コンクリートあるいは鋼管の許容応力度時のひずみとの比較を行う．

コンクリートが圧縮強度の 2/3（短期許容応力度）のときのひずみ ${}_c\varepsilon_a$は，式(10)の上式より ${}_c\varepsilon_a / {}_c\varepsilon_m = 1-3^{-1/a}$ となり，鋼管の応力が降伏応力（短期許容応力度）のときのひずみは降伏ひずみ ${}_s\varepsilon_y$で，${}_s\varepsilon_y = {}_s\sigma_y / {}_sE$（${}_sE$は鋼管のヤング係数）となる．

3. 解析結果

(1) 解析パラメータ

解析に用いたパラメータは下記の通りとした．柱の断面寸法は□−250×250×12 とした．

1) コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$：36，60，90，120N/mm²
2) 鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$：235，325，385，440，700N/mm²

CFT 指針に記載されている材料強度の適用範囲はコンクリートの設計基準強度F_cは 90N/mm²以下，鋼管の降伏強さF_yは 235〜440N/mm²である．コンクリートの設計基準強度 F_cをコンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$，鋼管の降伏強さ F_yを鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$とすると，コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$=120N/mm²，鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$=700N/mm²の場合は適用範囲外となる．本研究では今後CFT構造における高強度材料が使用されることを想定し，コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$=120N/mm²，鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$=700N/mm² の場合も検討する．また，幅厚比に関しては，CFT の場合は鋼構造許容応力度設計規準 [8]に規定されている矩形中空断面の幅厚比制限値の 1.5 倍まで緩和され，下式の制限がある．

$$
\frac{D}{t} \le 1.5 \times 1.6\sqrt{\frac{{}_sE}{{}_s\sigma_y}} \tag{23}
$$

上式に降伏応力度 ${}_s\sigma_y$=235，325，385，440，700N/mm² を代入するとそれぞれ，70，60，55，51，41 となり，本論文で選んだ幅厚比 21 は幅厚比制限値を満足している．

また，CFT 指針では部材の変形能力を確保するために短期荷重時において柱軸力の上限値 N_s が式(24)のように規定されている．

$$
N_s = \frac{1}{3}\,{}_cA \cdot F_c + \frac{2}{3}\,{}_sA \cdot F_y \tag{24}
$$

表−3 に解析変数に対する短期荷重時の軸力制限値 N_s を軸力比 n の値で示す．表より軸力制限値 n は 0.43〜0.60 であり，コンクリートの設計基準強度 F_c が大きいほど，鋼管の降伏強さ F_yが小さいほど n の値が小さく，軸力に対する制限が厳しくなる．本研究ではコンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみとそれぞれの材料の許容応力度時のひずみの比較を行い，単純累加強度時の断面のひずみの状態を明らかにするため，軸力比に関しては全範囲を対象として検討を行う．

(2) コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみ

図−5，図−6 に無次元化曲げモーメント m −無次元化軸力 n 相関関係，コンクリートあるいは鋼管の許容応力度時のひずみ(ε_a と記す)に対するコンクリートあるいは鋼

表−3 CFT 指針による軸力の制限値 n

鋼管の降伏強さ F_y(N/mm²)	コンクリートの設計基準強度 F_c (N/mm²)			
	F_c=36	F_c=60	F_c=90	F_c=120
F_y=235	0.53	0.49	0.46	0.43
F_y=325	0.56	0.52	0.48	0.46
F_y=385	0.57	0.53	0.50	0.47
F_y=440	0.58	0.54	0.51	0.48
F_y=700	0.60	0.57	0.54	0.52

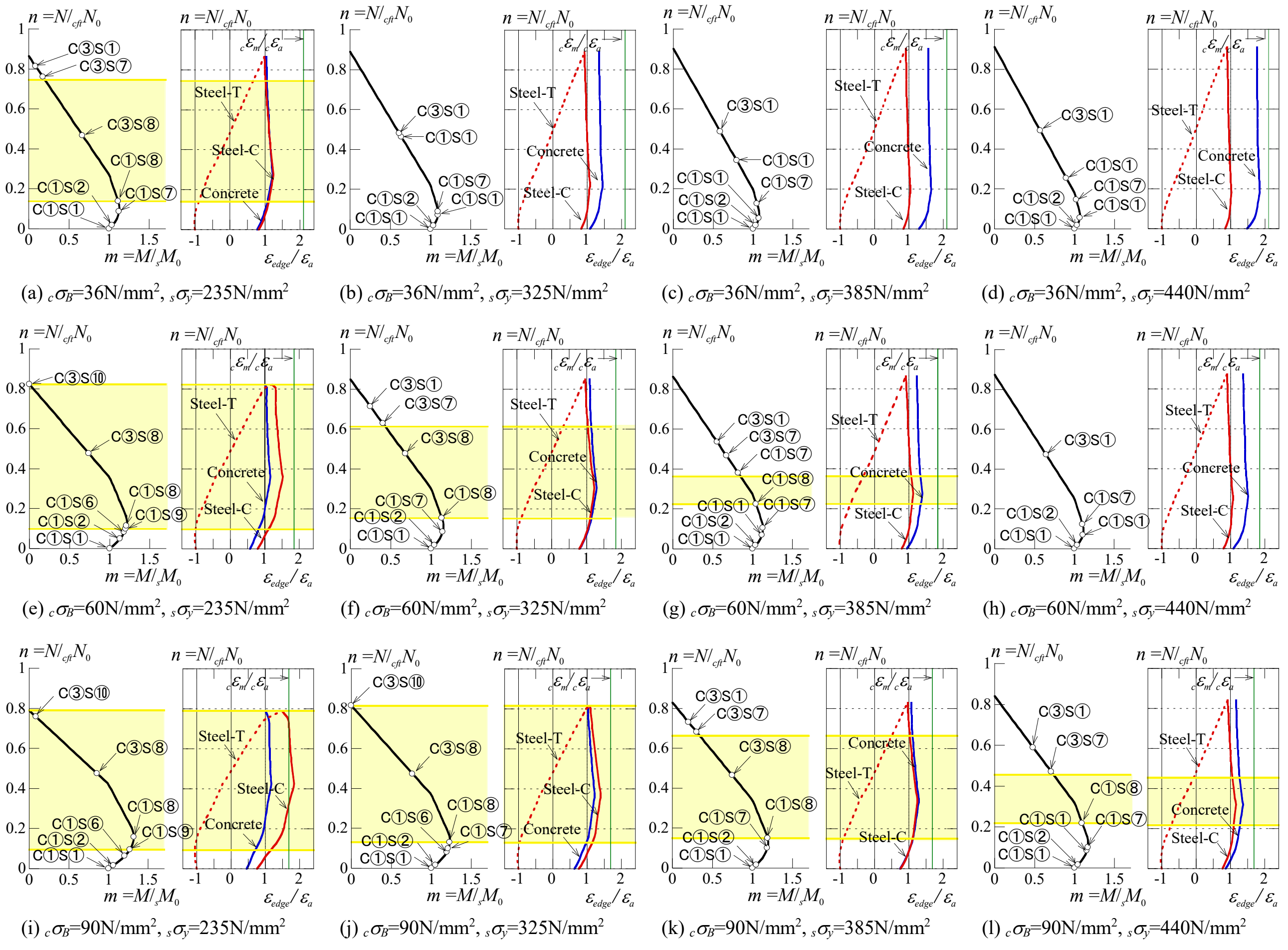
管の最外縁のひずみ（ε_{edge}と記す）の比$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$と無次元化軸力$n$の関係を示す．$m$–$n$相関関係中のC③S①などは，表–1および表–2に示すひずみ分布のケースの組合せをあらわしている．図中の○印のプロットは，軸力比が0から高くなるほうに見ていくときに，コンクリート，鋼管のひずみ分布のケースが切り替わる点を示すものである．例えば，図–5(a)であれば，n=0のときはコンクリートのケースはC①，鋼管もS①でコンクリートは圧縮強度時のひずみに達しておらず，鋼管も降伏ひずみに達していない．その後，n=0.02になると，鋼管のケースはS②となり引張縁のひずみが降伏応力度時のひずみを超えている．右図の$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$–$n$関係の青線，赤破線，赤実線はそれぞれコンクリートの圧縮縁，鋼管の引張縁，鋼管の圧縮縁の場合をあらわすものでそれぞれConcrete，Steel-T，Steel-Cとして矢印で指し示している．また，図中の${}_c\varepsilon_m/{}_c\varepsilon_a$はコンクリートの許容圧縮応力度時のひずみ${}_c\varepsilon_a$に対する圧縮強度時のひずみ${}_c\varepsilon_m$の比をあらわしている．この値よりも大きければコンクリートが圧縮強度に達している．

a) CFT指針の適用範囲内の場合

図–5にCFT指針の適用範囲を満たす場合のm–n相関関係および$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$–$n$関係を示す．上段の図(a)～(d)，中段の図(e)～(h)，下段の図(i)～(l)がコンクリートの圧縮強度がそれぞれ${}_c\sigma_B$=36，60，90N/mm^{2}の場合で，左から鋼管の降伏応力度が${}_s\sigma_y$=235，325，385，440N/mm^{2}となっている．

図–5によれば，軸力比n=0の場合，すべての解析変数においてひずみ分布のケースはコンクリートがC①，鋼管がS①となっていた．また，$|\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a|$の値は，鋼管はすべて1未満で，降伏ひずみに達していない．コンクリートについては${}_c\sigma_B$=36N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$=325，385，440N/mm^{2}の組合せ，${}_c\sigma_B$=60N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$=440N/mm^{2}の組合せ（図(b), (c), (d), (h)）はコンクリートが許容応力度時のひずみを超えていた．

また，曲げモーメントm=0の場合，コンクリートのケースはC③で鋼管のケースはS①あるいはS⑩であった．コンクリートと鋼管の両方が許容応力度時のひずみを超えているのは${}_c\sigma_B$=60N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$=235N/mm^{2}の組合せ（図(e)），${}_c\sigma_B$=90N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$=235，325N/mm^{2}の組合せで（図(i), (j)），鋼管は全断面が降伏ひずみを超えている．軸力のみ受ける場合について，CFT指針第2編では，コンクリートと鋼管の降伏ひずみが著しく異なる場合には，式



(a) ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=235N/mm^2　(b) ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2　(c) ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=385N/mm^2　(d) ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2

(e) ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=235N/mm^2　(f) ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2　(g) ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=385N/mm^2　(h) ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2

(i) ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=235N/mm^2　(j) ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2　(k) ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=385N/mm^2　(l) ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2

図–5　コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみと許容応力度時のひずみの比較
（CFT指針の適用範囲内の場合）

(4)，(5)を用いて両者を弾性に留めるように設計する，と記されている．しかし，単純累加によって求めた圧縮耐力と鋼管とコンクリートのいずれかが降伏と判定された時点での鋼管部分とコンクリート部分の軸力を足し合わせることで得られる降伏強度の比が 10%程度以内であれば，単純累加強度としても実用上は問題ないと考えられる．上記 3 つの組合せについて，式(4)，(5)を用いて求めた降伏軸力に対する式(2)，(3)を用いて求めた単純累加強度の比は，それぞれ 1.03，1.17，1.01 であり，${}_c\sigma_B$=90N/mm^2 と ${}_s\sigma_y$=235N/mm^2 の組合せについては単純累加強度ではなく，式(4)，(5)を使うほうが望ましい．

次に，n が変化することによるひずみの変化について記すと，低軸力域において，コンクリートと鋼管の引張フランジの両方が許容応力度時のひずみを超えているのは，${}_c\sigma_B$=36N/mm^2 と ${}_s\sigma_y$=325，385，440N/mm^2 の組合せ，${}_c\sigma_B$=60N/mm^2 と ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2 の組合せの場合（図(b)～(d)，(h)）であった．

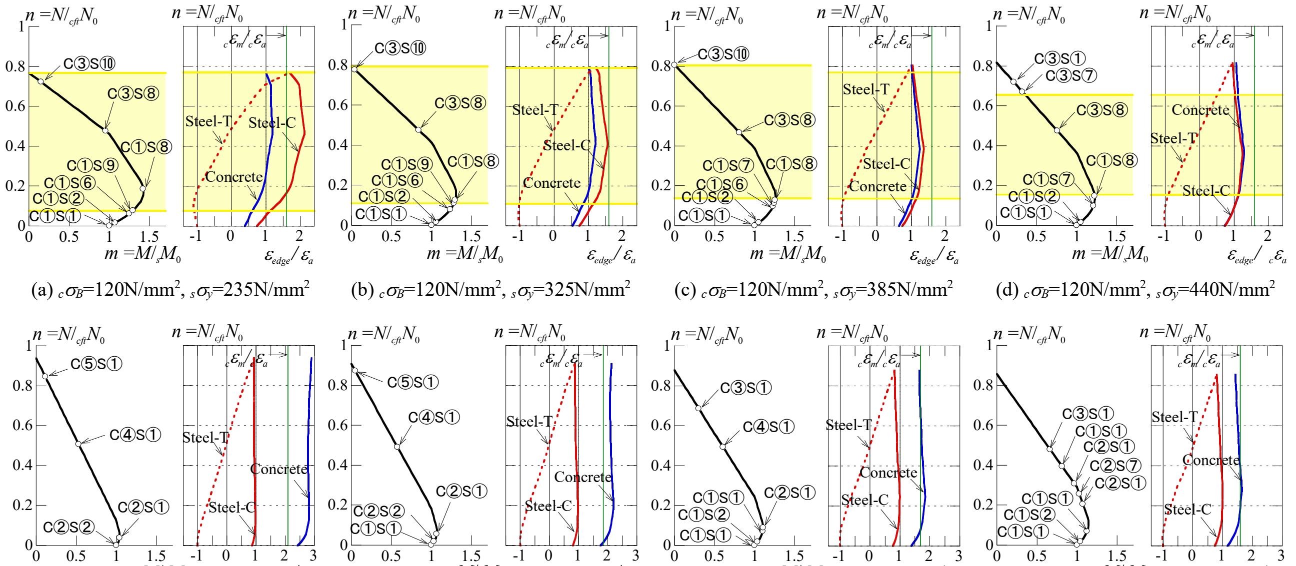
また，軸力比が大きくなると鋼管のひずみ分布はケース S⑧や S⑨となり，鋼管ウェブ部分まで降伏ひずみに達している．コンクリートを充填していない鋼柱では，鋼管の最外縁が降伏ひずみに達したときの軸力と曲げモーメントを許容耐力としているのに対し，単純累加強度時のCFT柱断面は，降伏ひずみに達している範囲がより大きくなっていると考えられる．図中に鋼管ウェブが降伏ひずみに達している領域を網掛けしている．図によれば，コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど，鋼管の降伏応力度が小さくなるほど，鋼管ウェブが降伏ひずみに達している軸力比の範囲が広くなっていることが分かる．また，鋼管ウェブが降伏ひずみに達しているのは，${}_c\sigma_B$=36N/mm^2 と ${}_s\sigma_y$=235N/mm^2 の組合せ，${}_c\sigma_B$=60N/mm^2 と ${}_s\sigma_y$=235，325，385N/mm^{2}の組合せ，${}_c\sigma_B$=90N/mm^2 とすべての鋼管の降伏応力度の場合（図(a)，(e)～(g)，(i)～(l)）であった．また，鋼管ウェブの引張ひずみが降伏ひずみに達している場合はなかった．

鋼管の引張ひずみが降伏ひずみを超えている範囲において，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$ の絶対値はいずれの組合せの場合も 1.05 以下となっている．また，圧縮ひずみについては，${}_s\sigma_y$=235N/mm^2 と ${}_c\sigma_B$=60，90N/mm^2 の組合せ（図(e)，(i)）を除けば，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の最大値は1.5以下となっている．なお，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$が最大値をとるのは${}_c\sigma_B$=90N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$=235N/mm^{2}の組合せ（図(i)）の場合でその値は 1.83 となっている．$\varepsilon_{edge}/{}_c\varepsilon_a$ が最大となるときの軸力比は，m-n 相関関係でコンクリート部分と鋼管部分が切り替わる点（図-2 における R 点）となっている．

b) CFT 指針の適用範囲外の場合

図-6 に CFT 指針の適用範囲外である，コンクリートの圧縮強度を ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2，鋼管の降伏応力度を ${}_s\sigma_y$=700N/mm^{2}としたときのm–n相関関係および$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$–$n$関係を示す．

図-6(a)～(d)にコンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2，鋼管の降伏応力度${}_s\sigma_y$=235，325，385，440N/mm^{2}の場合を示す．図-5 のときと同様に，軸力比 n=0 の場合，コンクリートと鋼管のひずみ分布のケースは C①S①となっており，いずれの場合もコンクリート，鋼管ともに許容応力度時のひずみには達していない．また，軸力比が増加するに従い，コンクリートの$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$ の値は増加し許容応力度時のひずみに達するようになる．低軸力域において，コンクリートはケース C①となり，コンクリートのひず



(a) ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=235N/mm^2　(b) ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2　(c) ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=385N/mm^2　(d) ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2

(e) ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=700N/mm^2　(f) ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=700N/mm^2　(g) ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=700N/mm^2　(h) ${}_c\sigma_B$=120N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=700N/mm^2

図-6　コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみと許容応力度時のひずみの比較
（CFT 指針の適用範囲外の場合）

みは許容応力度時のひずみより小さい．軸力比nが約0.2以上では，いずれの場合も許容応力度時のひずみを超えているが，圧縮強度時のひずみには達していない．

鋼管の圧縮縁における$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の値（右図の赤実線）も軸力比の増加に伴い大きくなり降伏ひずみに達し，降伏応力度が${}_s\sigma_y$=440N/mm^{2}の場合（図(d)）は，軸力比nが0.7より大きくなると$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の値が1よりも小さくなるが，その他の場合は1よりも大きくなり，軸力が大きくなると，ケースS⑩となり全断面圧縮降伏となっている．また，すべての組合せにおいて鋼管ウェブが降伏ひずみを超えている軸力比があり，その軸力比の範囲はCFT指針の適用範囲内と比較すると大きくなっている．

鋼管の圧縮側における$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の最大値は，${}_s\sigma_y$=385，440N/mm^{2}の場合ではCFT指針の適用範囲内の大半の解析変数の組合せと同様に1.5を超えていなかった．ただし，${}_s\sigma_y$＝235N/mm^{2}の場合，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の最大値は2.11であり，CFT指針の適用範囲内の最大値1.83よりも大きい．さらに，鋼管の引張ひずみに関しても，${}_s\sigma_y$=235N/mm^{2}の場合（図(a)），$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の絶対値の最大値は1.10とCFT指針の適用範囲内の場合と比較すると大きくなっていた．

図(e)～(h)に鋼管の降伏応力度${}_s\sigma_y$=700N/mm^2，コンクリートの圧縮強度がそれぞれ${}_c\sigma_B$=36，60，90，120N/mm^{2}の場合を示す．いずれの場合もコンクリートのひずみが許容応力度時のひずみを超えている．圧縮強度${}_c\sigma_B$=36N/mm^{2}の場合（図(e)）では軸力比nの全範囲，${}_c\sigma_B$=60，90，120N/mm^2（図(f)，(g)，(h)）では，それぞれ軸力比n=0.05~0.85（許容圧縮耐力），n=0.1~0.5，n=0.2~0.4のときはコンクリートの圧縮強度時のひずみ${}_c\varepsilon_m$を超えている．さらに，高軸力範囲においては圧縮強度${}_c\sigma_B$=36，60N/mm^{2}のとき（図(e)，(f)），コンクリートのひずみ分布がケースC⑤となり，コンクリートのひずみが全断面で圧縮強度時のひずみ${}_c\varepsilon_m$を超えていることもある．$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の値が最大となるのは${}_c\sigma_B$＝36N/mm^{2}の場合で2.90であり，ひずみとしては0.003程度となっていた．一方，鋼管の降伏ひずみが${}_s\varepsilon_y$＝0.34%と大きいため，鋼管のひずみ分布のケースはほとんどS①となり鋼管のひずみはほぼ降伏ひずみに達していない．本研究ではコンクリートは圧縮強度到達後も圧縮強度を保つものとして解析を行ったが，実際には角形CFTの場合，コンクリートは圧縮強度に到達したのち耐力が劣化すると考えられるため，単純累加強度で許容耐力を求めると危険側の評価となる．

(3) 現行指針における短期許容耐力に関する考察と今後の課題

現行指針の適用範囲における短期許容耐力について考察する．軸力のみあるいは軸力と曲げを受ける場合は，断面の一部が許容応力度時のひずみを超えている状況となっているが，コンクリートについてはいずれも圧縮強度時のひずみ${}_c\varepsilon_m$には到達していなかった．

また，鋼管のひずみに着目すると，${}_s\sigma_y$=235N/mm^{2}と${}_c\sigma_B$＝60，90N/mm^{2}の組合せを除く解析変数において，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の最大値は1.5以下となっていた．引張ひずみに関してはいずれの組合せにおいても$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の絶対値が1.05以下に収まっていた．したがって，鋼管のひずみで短期許容耐力時の状態をあらわすと，圧縮ひずみで1.5${}_s\varepsilon_y$（${}_s\varepsilon_y$は鋼管の降伏ひずみ）以下，引張ひずみに関しては1.05${}_s\varepsilon_y$以下であると言える．

コンクリートが圧縮強度時のひずみに達すると，角形CFT柱の場合，耐力の劣化が生じるが，今回の解析では圧縮強度時のひずみに達しているものはなく，鋼管のひずみも圧縮側で1.5${}_s\varepsilon_y$以下，引張側で1.05${}_s\varepsilon_y$以下とさほど大きくなく，現行の単純累加強度を短期許容耐力として用いていることは妥当であると考えられる．

しかしながら，CFT指針の適用範囲以外の場合は，まず，コンクリートの圧縮強度が120N/mm^{2}の場合は先ほど述べたひずみを超える場合がある．700N/mm^{2}級鋼材のような高強度鋼材は降伏比も大きく，コンクリートが圧縮強度時のひずみに達する場合もあることから一定の安全率を設けるなどの制限が必要であると考えられる．

4. まとめ

本研究は，角形CFT柱を対象とし，単純累加強度で求めた短期許容曲げ耐力になるときの重心軸ひずみと曲率を平面保持の仮定に基づき数値計算にて求めた．コンクリートの圧縮強度と鋼管の降伏応力度は，CFT指針の適用範囲である${}_c\sigma_B$=36，60，90N/mm^2，${}_s\sigma_y$=235，325，385，440N/mm^{2}と，適用範囲外となる${}_c\sigma_B$=120N/mm^2，${}_s\sigma_y$＝700N/mm^{2}を組み合わせて解析を行い，コンクリートおよび鋼管の最外縁のひずみε_{edge}とそれぞれの材料の許容応力度時のひずみε_aの比$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$と軸力比$n$の関係を示し，解析変数との関係について考察した．得られた知見を以下に示す．

(I) CFT指針の適用範囲内の場合（図−5）

1) いずれの解析変数の組合せにおいてもコンクリートのひずみが許容応力度時のひずみを超えている軸力比の範囲があったが，コンクリートの圧縮強度時のひずみに達している解析変数の組合せはなかった．また，${}_c\sigma_B$＝36N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$＝235N/mm^{2}の組合せ，${}_c\sigma_B$＝60N/mm^{2}と${}_s\sigma_y$＝235，325，385N/mm^{2}の組合せ，${}_c\sigma_B$＝90N/mm^{2}とすべての鋼管の降伏応力度の場合，鋼管のひずみはフランジ，ウェブともに許容応力度時のひずみに達していた．
2) 鋼管の引張ひずみが降伏ひずみを超えている場合，引

張ひずみについては，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の絶対値はいずれの組合せの場合でも1.05以下となっていた．圧縮ひずみについては，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の最大値は1.83で，${}_s\sigma_y$=235N/mm^{2}と${}_c\sigma_B$=60，90N/mm^{2}の組合せを除けば，1.5以下となっていた．

3) CFT指針における単純累加強度による短期許容耐力時において，コンクリートのひずみは圧縮強度時のひずみ${}_c\varepsilon_m$に達しておらず，鋼管のひずみで断面の状態をあらわすと，圧縮ひずみで1.5${}_s\varepsilon_y$，引張ひずみでは1.05${}_s\varepsilon_y$である．また，${}_s\sigma_y$=235N/mm^{2}と${}_c\sigma_B$=60，90N/mm^{2}の組合せを除けば，上記のひずみ内に収まっており，単純累加強度で短期許容耐力を算定することは妥当であると言える．

(Ⅱ) CFT指針の適用範囲外の場合（図−6）

4) コンクリートの圧縮強度${}_c\sigma_B$=120N/mm^{2}の場合，鋼管ウェブが降伏ひずみに達しており，その軸力比の範囲はCFT指針の適用範囲内の材料強度の組合せと比較すると大きかった．コンクリートのひずみは許容応力度時のひずみを超えているが圧縮強度時のひずみには達していなかった．鋼管のひずみについては，$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の絶対値の最大値は引張ひずみでは1.10，圧縮ひずみでは2.11となり，CFT指針の適用範囲内における最大値よりも大きくなっていた(図−6(a)～(d)).

5) 鋼管の降伏応力度${}_s\sigma_y$=700N/mm^{2}の場合，コンクリートの圧縮強度が${}_c\sigma_B$=36N/mm^{2}の場合では軸力比nの全範囲，${}_c\sigma_B$=60，90，120N/mm^{2}では，それぞれ軸力比がn=0.05~0.85（許容圧縮耐力），n=0.1~0.5，n=0.2~0.4において，コンクリートのひずみは圧縮強度時のひずみに達していた．一方で，鋼管のひずみはほぼ降伏ひずみに達していなかった．また，${}_c\sigma_B$=36N/mm^{2}の場合コンクリートの$\varepsilon_{edge}/\varepsilon_a$の最大値は2.90であり，ひずみとしては0.003程度となっていた(図−6(e)～(h)).

謝辞

北九州市立大学名誉教授津田惠吾先生には貴重なご助言をいただいた，感謝申し上げます．本研究は科研費（課題番号 22K04415）の助成を受けたものである．関係各位に感謝します.

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
2) 劉青崧，城戸將江，津田惠吾：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，鋼構造年次論文報告集，第17巻，pp.587-594，2009
3) 藤岡大二郎，城戸將江，崔剛：コンクリート充填角形鋼管柱の降伏耐力評価式，鋼構造論文集，Vol.27，No.105，pp.61-76，2020
4) A.Fafitis and S.P.Shah：Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Journal of American Concrete Institute, Vol. 87, No. 12, pp.213-232, 1985
5) 崎野健治，蜷川利彦，中原浩之，山口達也：高強度材料を用いたコンクリート充填円形鋼管柱の単調等曲げ性状，構造工学論文集，Vol.49B，pp.465-472，2003
6) Popovics，S.:A Numerical Approach to Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-299, 1973
7) Martinez，S.，Nilson，A.h. and Slate，F.O.：Spirally Reinforced High - Strength Concrete Columns, Journal of ACI, Vol.81, No.35, pp.431-442, 1984
8) 日本建築学会：鋼構造許容応力度設計規準，2019

(Received August 25, 2023)

STRAIN DISTRIBUTION OF THE CROSS-SECTION AT THE SIMPLE SUPERPOSED STRENGTH OF CONCRETE FILLED SQUARE STEEL TUBULAR SECTION

Mao LIU, Takuma NISHIMURA and Masae KIDO

In this study, the centroidal axis strain and curvature in case where the short-term allowable flexural strength of concrete filled squared steel tubular section was obtained by using simple superposed strength, were numerically calculated based on the assumption of Navier’s hypothesis, and the strain distribution across the section under the condition of simple superposed strength was presented. A comparison was made between the strains at the outermost edges of concrete and steel tube, and the strains at the allowable stress of each material by taking the strengths of concrete and steel tube as parameters. The compressive strength of concrete ${}_c\sigma_B$ and the yield strength of steel tube ${}_s\sigma_y$ were chozen for the values within the AIJ CFT reccomendation's application range, ${}_c\sigma_B$=36, 60, 90 N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=235, 325, 385, 440 N/mm^2, as well as the values outside this range, ${}_c\sigma_B$=120 N/mm^2, ${}_s\sigma_y$=700 N/mm^2. The relationship between the strains at the outermost edges of concrete and steel tube ε_{edge} and the strains at the allowable stress of each material ε_a, along with the axial force ratio n were presented and discussed in relation to the analytical parameters.