(1) コンクリート充填角形鋼管柱の降伏耐力簡易評価法に関する研究

崔　剛 [1]・城戸　將江 [2]・劉　懋 [3]

[1] 正会員　北九州市立大学大学院生　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: a9dbb005@eng.kitakyu-u.ac.jp

[2] 正会員　北九州市立大学准教授　国際環境工学部(〒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

[3] 正会員　徳山工業高等専門学校助教　土木建築工学科(〒745-8585 山口県周南市学園台)
E-mail: liu@tokuyama.ac.jp

本研究の目的は，簡便に角形 CFT 柱の降伏耐力を算定できる評価式を提案することである．コンクリートの圧縮縁の圧縮応力がコンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ の 2/3 に達したとき，あるいは鋼管の最外縁応力が降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ に達したときの曲げモーメントのうち，いずれか小さい方が降伏曲げモーメントである．平面保持の仮定に基づき，コンクリートの応力ーひずみ関係を 2 次式とし，鋼材を完全弾塑性として降伏耐力を算定し，曲げモーメントー軸力相関関係で示し，簡易評価式として降伏耐力の *m-n* 相関関係を直線式で近似した．

提案した簡易評価式は，今回解析したパラメータの範囲では降伏耐力に対してほぼ安全側の評価ができた．本解析パラメータのうち，${}_c\sigma_B$＝60N/mm^2，幅厚比 ${}_sD/t$＝40 の組み合わせを除けば，簡易式は降伏耐力をよく評価できる．

Key Words: *steel-concrete composite member, superposed strength, allowable strength, restoring force characteristic*

1. 序論

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，CFT 柱材の復元力特性について，**図-1** に示すように，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．第一折れ点の曲げ耐力 M_y は短柱の降伏曲げ耐力を用いることとしている [1)]．

第一折れ点の降伏曲げ耐力について CFT 指針では，「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，累加強度によって算定することとなっている．

降伏曲げ耐力については，文献 2)において角形 CFT 柱の降伏耐力（コンクリートもしくは鋼管が降伏と判定された時の耐力）と累加強度の関係について，鋼管の降伏応力度，幅厚比，コンクリート圧縮強度の影響が明らかにされている．鋼管の降伏応力度が大きいとき，幅厚比が小さいとき，およびコンクリート圧縮強度が小さいとき，累加強度と降伏耐力に大きな違いが出ることが示され，最大で累加強度は降伏耐力の約 2 倍程度となっていた．すなわち，**図-1** において M_y の値が算出方法によって異なることが示唆されている．また，降伏耐力は陽な形で示されておらず，繁雑な計算が必要である．

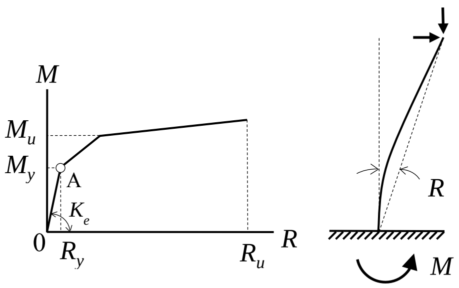


図-1　CFT 指針の復元力特性モデル [2)]

文献 3)では，CFT 柱部材の弾性限を鋼管断面最外縁の降伏とし，その弾性限界式を円形断面，角形断面に対して示している．しかしながら，コンクリート部分が降伏するという状態は想定していない．CFT 柱の M_y として，累加強度と降伏耐力のいずれとすべきかは現時点で広く認められた見解はないが，コンクリートの降伏でCFT柱の降伏耐力が決定される場合の降伏耐力評価法があれば，設計の際に用いることができると考えられる．特に今後高強度鋼材が用いられるようになると，コンクリート強度によっては，コンクリートでCFT柱の降伏耐力が決定付けられる場合が多くなる．

本研究の目的は，簡便に角形CFT柱の降伏耐力を算定できる評価式を提案することである．文献 2)で示された計算方法をもとに，降伏耐力の *m-n* 相関関係上における特徴を示し，直線式として近似した．さらに，評価式の精度を検討するとともに，計算例を示した．

2. 降伏耐力算定法 [2)]

文献 2)ではコンクリートの圧縮縁の圧縮応力がコンクリート圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ の 2/3 に達したとき，あるいは鋼管の最外縁応力が降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ に達したときの曲げモーメントのうち，いずれか小さい方を降伏曲げモーメントとして算定している．本章で，その概要を示す．

(1) 応力－ひずみ関係

図-2 に示すように，鋼管の応力 ${}_s\sigma$－ひずみ ${}_s\varepsilon$ 関係は完全弾塑性型とし，コンクリートの応力 ${}_c\sigma$－ひずみ ${}_c\varepsilon$ 関係は式(1)の放物線として仮定している（${}_c\sigma_B$, ${}_c\varepsilon_m$ 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，引張応力は負担しない．

$$\frac{{}_c\sigma}{{}_c\sigma_B} = 2\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m} - \left(\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m}\right)^2 \tag{1}$$

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 ${}_c\varepsilon_{cr}$）は式(1)より ${}_c\varepsilon_{cr}/{}_c\varepsilon_m = (3-\sqrt{3})/3$ となる．なお，鋼管の応力―ひずみ関係として，メネゴットピント [4)] モデルなども考えられるが，完全弾塑性型は基本的なモデルであるため選択した．

(2) 曲げモーメントと軸力

図-3に示す正方形CFT断面を対象とし，平面保持の仮定に基づき，図-4 に示すようなひずみ分布の下で，コンクリート部分および鋼管部分の曲げモーメント ${}_cM$, ${}_sM$ と軸力 ${}_cN$, ${}_sN$ を計算している．なお，重心軸ひずみと曲率は，それぞれ無次元量 ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$，${}_c\tilde{\varphi}$ で表現する．

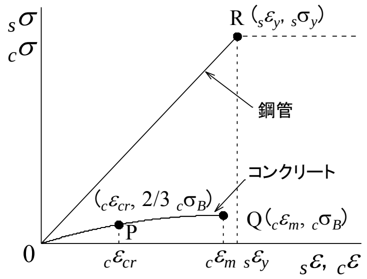
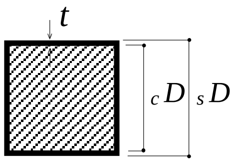


図-2 応力―ひずみ関係 [2)]



柱断面

${}_sD$：鋼管幅，せい
${}_cD$：コンクリート幅，せい
t：鋼管の板厚

図-3 柱断面

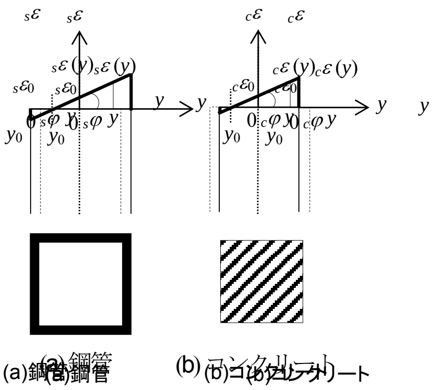


図-4 ひずみ分布

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0 = \frac{{}_c\varepsilon_0}{{}_c\varepsilon_m} \tag{2}$$

$${}_c\tilde{\varphi} = \frac{{}_c\varphi\,{}_cD}{{}_c\varepsilon_m} \tag{3}$$

式(3)中 ${}_cD$ は図-3 に示すようにコンクリートの断面せいである．

a) コンクリート部分の曲げモーメントと軸力

コンクリート部分の無次元化曲げモーメント ${}_cm={}_cM/{}_cM_0$ (${}_cM_0 \equiv {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^3$)と無次元化軸力 ${}_cn={}_cN/{}_cN_0$(${}_cN_0 \equiv {}_c\sigma_B \cdot {}_cD^2$) を，重心軸ひずみ ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ と曲率 ${}_c\tilde{\varphi}$ の関係で表すと，次のようになる．

(ⅰ)中立軸が断面内の場合

$$\begin{aligned}{}_cm = &\frac{1}{4}{}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{12}{}_c\tilde{\varphi} - \frac{1}{8}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^2 - \frac{1}{12}{}_c\tilde{\varepsilon}_0 \cdot {}_c\tilde{\varphi} \\ &- \frac{1}{64}{}_c\tilde{\varphi}^2 - \frac{1}{3}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^3 \cdot \frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}^2} + \frac{1}{12}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^4 \cdot \frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}^2}\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}{}_cn = &{}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{4}{}_c\tilde{\varphi} - \frac{1}{2}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^2 - \frac{1}{4}{}_c\tilde{\varepsilon}_0 \cdot {}_c\tilde{\varphi} \\ &- \frac{1}{24}{}_c\tilde{\varphi}^2 + {}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^2 \cdot \frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}} - \frac{1}{3}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^3 \cdot \frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}}\end{aligned} \tag{5}$$

(ⅱ)中立軸が断面外の場合

$${}_cm = \frac{1}{6}\left({}_c\tilde{\varphi} - {}_c\tilde{\varepsilon}_0 \cdot {}_c\tilde{\varphi}\right) \tag{6}$$

$${}_cn = {}_c\tilde{\varepsilon}_0 - {}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^2 - \frac{1}{12}{}_c\tilde{\varphi} \tag{7}$$

b)　鋼管部分の曲げモーメントと軸力

鋼管部分の無次元化曲げモーメント ${}_sm\,(={}_sM/{}_sM_y$：${}_sM_y$は鋼管の降伏モーメントで，${}_sM_y\equiv{}_sZ\cdot{}_s\sigma_y$ (${}_sZ$：鋼管の断面係数))と無次元化軸力 ${}_sn\,(={}_sN/{}_sN_y$：${}_sN_y$は降伏軸力で，${}_sN_y\equiv{}_sA\cdot{}_s\sigma_y$ (${}_sA$：鋼管の断面積))を，重心軸ひずみ ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ と曲率 ${}_c\tilde{\varphi}$ で表すと次のようになる．

$$ {}_sm = \frac{1}{2}\cdot\frac{{}_sD}{{}_cD}\cdot\frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_c\tilde{\varphi} \tag{8} $$

$$ {}_sn = \frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_c\tilde{\varepsilon}_0 \tag{9} $$

上式中，${}_sD$ は鋼管せい，${}_s\varepsilon_y$ は鋼管の降伏ひずみである．

(3)　CFT 柱の降伏条件と降伏耐力

平面保持の仮定より，図-4 において y の位置のコンクリートのひずみは下式で表される．

$$ {}_c\varepsilon(y) = {}_c\varepsilon_0 + y\cdot{}_c\varphi \tag{10} $$

CFT 柱が降伏したとみなせる条件は式(10)より次のように求まる．

コンクリートのひずみが限界ひずみ ${}_c\varepsilon_{cr}$ (${}_c\sigma=2/3{}_c\sigma_B$の時のひずみ)となる時.

$y={}_cD/2$ のときのひずみが ${}_c\varepsilon_{cr}$ となることから

$$ {}_c\tilde{\varepsilon}_0 + \frac{1}{2}{}_c\tilde{\varphi} = \frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m} \tag{11} $$

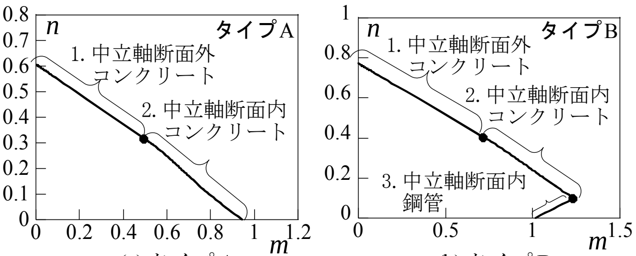
上式を変形すると，下式となる．

$$ {}_c\tilde{\varphi} = \frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}\cdot\frac{1}{\dfrac{{}_c\tilde{\varepsilon}_0}{{}_c\tilde{\varphi}}+\dfrac{1}{2}} \tag{12} $$

同様にして，鋼管が降伏した場合は次のようになる．

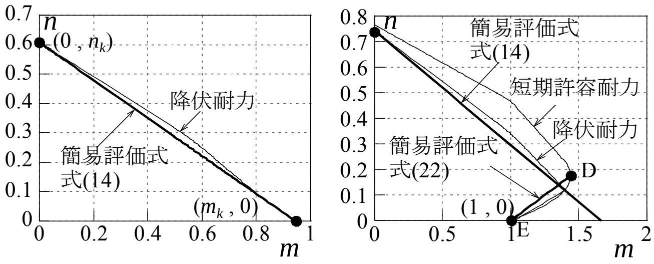
$$ \left.\begin{array}{l} \text{鋼管の引張側ひずみが}\ {}_s\varepsilon_y\ \text{となる時} \\ {}_c\tilde{\varphi} = -\dfrac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m}\cdot\dfrac{1}{\dfrac{{}_c\tilde{\varepsilon}_0}{{}_c\tilde{\varphi}}-\dfrac{1}{2}\cdot\dfrac{{}_sD}{{}_cD}} \\ \text{鋼管の圧縮側ひずみが}\ {}_s\varepsilon_y\ \text{となる時} \\ {}_c\tilde{\varphi} = \dfrac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m}\cdot\dfrac{1}{\dfrac{{}_c\tilde{\varepsilon}_0}{{}_c\tilde{\varphi}}+\dfrac{1}{2}\cdot\dfrac{{}_sD}{{}_cD}} \end{array}\right\} \tag{13} $$

CFT 柱の降伏耐力は次のように求める．断面寸法，材料強度を設定し，${}_c\tilde{\varepsilon}_0/{}_c\tilde{\varphi}$ の値を与え，式(12), (13)を用いて ${}_c\tilde{\varphi}$ を求める．次に ${}_c\tilde{\varphi}$ に ${}_c\tilde{\varepsilon}_0/{}_c\tilde{\varphi}$ を乗じ ${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ を求める．これらの値を用いて式(4)~(9)より，軸力，曲げモーメントを算定する．



(a) タイプ A　　(b) タイプ B

図-5　降伏耐力



(a)コンクリートで決まる　　(b)コンクリートと鋼管で決まる

図-6　簡易評価式

(4)　m-n 相関関係における降伏耐力の特徴

CFT 断面の降伏耐力は，中立軸の位置と限界状態となる断面部位によって次のような条件で決定される．

1：中立軸が断面外でコンクリートが限界ひずみ ${}_c\varepsilon_{cr}$に達する場合

2：中立軸が断面内でコンクリートが限界ひずみ ${}_c\varepsilon_{cr}$に達する場合

3：中立軸が断面内で鋼管が引張降伏する場合

4：中立軸が断面内で鋼管が圧縮降伏する場合

図-5 に降伏耐力に関する *m-n* 相関関係の例を示す．無次元化曲げモーメント m と無次元化軸力 n は，それぞれ ${}_sM_y$ と CFT 断面の圧縮耐力 N_0(=${}_s\sigma_y\cdot{}_sA+{}_c\sigma_B\cdot{}_cA$，${}_sA$：鋼管の断面積，${}_cA$：コンクリートの断面積)で無次元化している．2 つの条件（1，2）で降伏耐力が決まるものをタイプ A(図-5(a))，3 つの条件（1，2，3）で降伏耐力が決まるものをタイプ B(図-5 (b))，4 つの条件（1，2，3，4）で降伏耐力が決まるものをタイプ B*とする．なお，図には示していないがタイプ B*の *m-n* 相関関係はタイプ B と同様の形状となっていた．タイプ A はすべてコンクリートで降伏耐力が決まり，タイプ B は低軸力の範囲において，鋼管で降伏耐力が決まっている．

3.　簡易評価式

2 章(4)で示したように，*m-n* 相関関係において降伏耐力はタイプ A とタイプ B(タイプ B*)に分けられる．それぞれのタイプに対して降伏耐力の近似簡易評価式を求める．

(1)　タイプＡの場合

タイプ A の場合，m-n 関係はほぼ直線的な関係にある．そこで，簡易評価式として降伏耐力の m-n 相関関係上で m=0 と n=0の点を結んだ直線式で表すこととする(図-6(a))．m=0 のときの n を n_k，n=0 のときの m を m_k とすると近似曲げ耐力 m_{mod1} と n の関係は式(14)となる．したがって軸力比 n，n_k，m_k がわかれば，CFT 柱の降伏曲げモーメントが計算できる．

$$m_{mod1}=-\frac{m_k}{n_k}n+m_k \tag{14}$$

文献 2)に圧縮力のみをうける場合の降伏強度が示されており，n_kは次式で表される．

$$n_k=\frac{\frac{2}{3}{}_c\sigma_B\cdot{}_cA+{}_sE\cdot{}_c\varepsilon_{cr}\cdot{}_sA}{{}_s\sigma_y\cdot{}_sA+{}_c\sigma_B\cdot{}_cA} \tag{15}$$

m_kは式(16)で得られる．

$$m_k=\frac{{}_cm\cdot{}_cM_0+{}_sm\cdot{}_sM_y}{{}_sM_y} \tag{16}$$

式(16)中の ${}_cm$，${}_sm$ は中立軸が断面内で，コンクリートのひずみが限界ひずみとなる場合の，コンクリートと鋼管の無次元化曲げモーメントである．したがって，式(4)と式(8)を代入すると，式(16)は式(17)となる．

$$\begin{aligned}m_k&=\frac{{}_cm\cdot{}_cM_0+{}_sm\cdot{}_sM_y}{{}_sM_y}\\&=\Big(\frac{1}{4}{}_c\tilde{\varepsilon}_0+\frac{1}{12}{}_c\tilde{\varphi}-\frac{1}{8}{}_c\tilde{\varepsilon}_0^{\,2}-\frac{1}{12}{}_c\tilde{\varepsilon}_0\cdot{}_c\tilde{\varphi}\\&\quad-\frac{1}{64}{}_c\tilde{\varphi}^2-\frac{1}{3}{}_c\tilde{\varepsilon}_0^{\,3}\cdot\frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}^2}+\frac{1}{12}{}_c\tilde{\varepsilon}_0^{\,4}\cdot\frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}^2}\Big)\cdot\frac{{}_cM_0}{{}_sM_y}\\&\quad+\frac{1}{2}\cdot\frac{{}_sD}{{}_cD}\cdot\frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_c\tilde{\varphi}\end{aligned} \tag{17}$$

また，式(17)中の ${}_cm$，${}_sm$ は，軸力 $N=0$ とコンクリート部分が限界ひずみに達するという以下の 2 つの条件から求めることができる．

$${}_cn\cdot{}_cN_0+{}_sn\cdot{}_sN_y=0 \tag{18}$$

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0+\frac{1}{2}{}_c\tilde{\varphi}=\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m} \qquad \text{再掲(11)}$$

式(18)より，${}_c\tilde{\varphi}$ は下式となる．

$${}_c\tilde{\varphi}=\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}\left\{1+\sqrt{1-2\left(\frac{1}{3}\cdot\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-1\right)\cdot\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m}\cdot\frac{{}_cN_0}{{}_sN_y}}\right\} \tag{19}$$

式(11)を変形し，${}_c\tilde{\varepsilon}_0$は下式で計算できる．

$${}_c\tilde{\varepsilon}_0=\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-\frac{1}{2}{}_c\tilde{\varphi} \tag{20}$$

つまり，式(19)，(20)で ${}_c\tilde{\varphi}$，${}_c\tilde{\varepsilon}_0$ を計算し，式(17)に代入することで m_kの値を得ることができる．

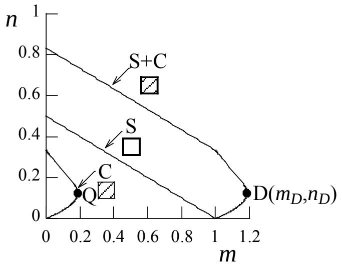


図-7　累加強度

表-1　各パラメータと降伏耐力タイプ（${}_c\varepsilon_m$=0.2%）

${}_c\sigma_B$	24			36			60		
${}_s\sigma_y$	235	325	440	235	325	440	235	325	440
${}_sD/t$=40	B	A	-	B	A	-	B	A	A
${}_sD/t$=30	A	A	-	B	A	-	B	A	A
${}_sD/t$=20	A	A	-	B	A	-	B	A	A

表-2　各パラメータと降伏耐力タイプ（${}_c\varepsilon_m$=0.25%）

${}_c\sigma_B$	24			36			60		
${}_s\sigma_y$	235	325	440	235	325	440	235	325	440
${}_sD/t$=40	B	A	-	B	B	-	B	B	A
${}_sD/t$=30	B	A	-	B	A	-	B	B	A
${}_sD/t$=20	B*	A	-	B*	A	-	B*	A	A

${}_s\sigma_y$，${}_c\sigma_B$の単位はN/mm^{2}である．

(2)　タイプＢの場合

図-5(b)の 3 の部分は中立軸が断面内で，鋼管の引張降伏で降伏耐力が決まる場合である．この部分もおおむね直線的な関係となっていることから直線式で表すこととした．しかしながら，図-5 (b)の②と③の交点は簡単な式とはならない．よって，図-6(b)の D 点と E 点を結んだ式を，簡易評価式とする．ここでD点は図-7 に示す累加強度 [1)]のコンクリート部分(図中 C)の極大値 Q 点に対応する単純累加強度の点である．

D 点の座標(m_D，n_D)は下式である．

$$\left(m_D,n_D\right)=\left(1+\frac{{}_c\sigma_B\cdot{}_cD^3}{16{}_sM_y},\frac{{}_c\sigma_B\cdot{}_cD^2}{4N_0}\right) \tag{21}$$

図-6(b)の E 点は m=1 とは限らないが，本論では近似的に 1 とした．D 点と E 点(m，n)=(1，0)を結んだ直線式を簡易評価式として，式(22)が得られる．

$$m_{mod2}=\frac{N_0\cdot{}_cD}{4{}_sM_y}n+1 \tag{22}$$

また，D 点よりも軸力が大きい場合は式(14)で降伏曲げ耐力が計算できる．

タイプ B の場合，式(14)と式(22)の両方の値を計算し，いずれか小さい方の値を降伏曲げ耐力とする．

(3) タイプの判別方法

式(17), (19), (20)より m_k の値を算定し，1 を超えた場合は，タイプ B となる．

4. 結果と考察

(1) 解析パラメータ

解析パラメータとして以下のものを選んだ．

1) 角形鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ (235，325，440 N/mm²)
2) コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ (24，36，60N/mm²)
3) コンクリートの圧縮強度時のひずみ ${}_c\varepsilon_m$ (0.2%，0.25%)
4) 鋼管の幅厚比 ${}_sD/t$ (20，30，40)

${}_s\sigma_y$=440N/mm² については ${}_c\sigma_B$=60N/mm² のコンクリートとの組み合わせのみ計算した．これは，高強度鋼材であれば Fc60 程度の組み合わせとなると考えたためである．

表-1，**表-2** はそれぞれ ${}_c\varepsilon_m$ が 0.2%，0.25%の時の各パラメータと降伏耐力タイプの関係を表している． 表によれば ${}_c\varepsilon_m$＝0.2%のほうがタイプ A が多く，タイプ B*は ${}_c\varepsilon_m$＝0.25%の時のみ生じている．

(2) 精度の検討

図-8 (a)~(f)に 3 章で提案した簡易評価式より求めた m-n 相関関係を太線で示す．以降，簡易評価式を用いて計算した降伏耐力を降伏耐力計算値とよぶ．2 章で示した文献 2)の方法で求めた降伏耐力と**図-7** で示した累加強度も図中に記す．また，**図-8** (g)，(h)に降伏耐力と降伏耐力計算値の誤差 Δm_r を示している．誤差 Δm_r は，**図-9** に示すように，同じ軸力比における降伏耐力 m_y と降伏耐力計算値 m_{mod} の誤差 Δm (= m_y - m_{mod})を求め，m_y で除し，100 分率で表したもの Δm_r (＝Δm /m_y×100%)である．

表-3 各パラメータの耐力比 ${}_sN_y/{}_cN_0$ の値

${}_c\sigma_B$	24			36			60		
${}_s\sigma_y$	235	325	440	235	325	440	235	325	440
${}_sD/t$=40	1.06	1.46	-	0.71	0.98	-	0.42	0.59	0.79
${}_sD/t$=30	1.45	2.00	-	0.97	1.34	-	0.58	0.80	1.09
${}_sD/t$=20	2.30	3.18	-	1.53	2.12	-	0.92	1.27	1.72

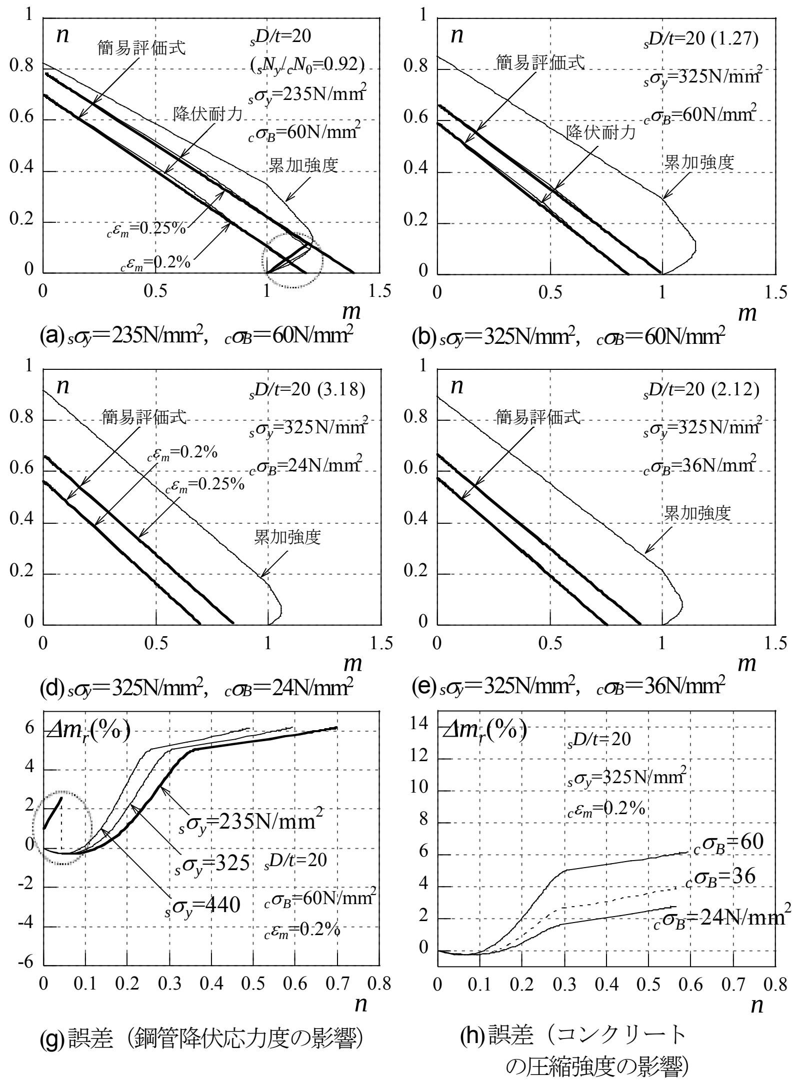


図-8 解析結果

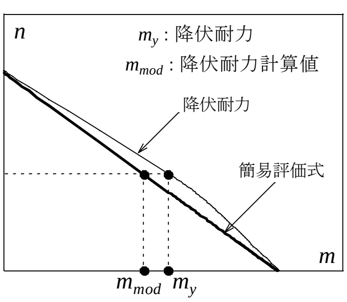


図-9 降伏耐力と降伏耐力計算値の差

図-8 (a)～(f)によれば，降伏耐力と降伏耐力計算値はおおむね対応している．

また，図-8 (g)，(h)によれば，Δm_r の値は軸力比が 0.1 程度までは負の値となっており危険側の評価となる．また，n が 0.1 を超える範囲ではほぼ正の値で安全側となっていた．降伏耐力と降伏耐力計算値の差について 4 章(2)節 b)，c)項にて詳細に検討する．

a) 材料強度の影響

図-8 (a)～(c)に幅厚比 ${}_sD/t$ が 20 (図中括弧の中は耐力比 ${}_sN_y/{}_cN_0$ である，表-3 参照)，コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ が 60N/mm²，鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ が 235，325，440N/mm² の場合の m-n 相関関係を示し，図-8 (g)に n-Δm_r 相関関係を示す．

図-8 (a)～(c)によれば降伏耐力計算値と降伏耐力の対応は良好である．しかしながら図-8 (a)では，タイプ B (タイプ B*)となり，鋼管で降伏耐力が決まる場合がある（図-8(a)の丸で囲んだ箇所）．この時は，降伏耐力計算値と降伏耐力の差がやや大きくなっていることがわかる．

図-8(g)によれば，鋼管の降伏応力度によらず，Δm_r の最大値はほぼ同じ値で 6%程度となっている．また同じ軸力比の場合は，鋼管の降伏応力度が大きいほうが差 Δm_r が大きい．ただし，図-8(g)の丸で囲んだところは，図-8 (a)の丸で囲んだ箇所と対応しており，差が不連続となっている．

図-8(d)~(f)に幅厚比 ${}_sD/t$ が 20，鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ が 325N/mm²，コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ が 24，36，60N/mm² の場合の m-n 相関関係を示し，図-8(h)に n-Δm_r 相関関係を示す．

図-8 (d)～(f)によれば降伏耐力計算値と降伏耐力はおおむね一致している．また，図-8 (h)によれば同じ軸力比の時，コンクリート強度が大きくなるほど，Δm_r の値も大きくなる．

b) 安全側の評価となる場合の降伏耐力と降伏耐力計算値の差

図-10 に $\Delta m (= m_y - m_{mod})$ の例を示す．降伏耐力と降伏耐力計算値の差が最も大きくなるのは n=0.3 近傍である．そこで，Δm の最大値(Δm_{max}，図-10 中◇印で示す)を全解析パラメータに対して求めた．Δm_{max} の値を図-11 に示す．図によればコンクリート強度が大きくなるにつれ，鋼管の降伏応力度が小さくなるにつれ差が大きくなっており，その最大値は 0.11 程度であった．

次に m_y に対する Δm_{max} の比 $\Delta m_{max}/m_y$ を図-12 に示す．図中黒く塗りつぶした ${}_c\varepsilon_m$＝0.2%の場合，幅厚比，コンクリート強度が同じであれば，鋼管の降伏応力度が異なっても同じ値となっている．これは，簡易評価式としてすべて式(14)を用い，降伏耐力もすべて図-5 中②の条件となっているためである．また，白抜きのプロットは ${}_c\varepsilon_m$＝0.25%のときの $\Delta m_{max}/m_y$ の値である．${}_c\varepsilon_m$＝0.25%のとき同じ幅厚比，コンクリート強度でも，鋼管の降伏応力度によって $\Delta m_{max}/m_y$ の値が異なっている場合がある．これは鋼管の降伏応力度が小さい場合，鋼管の引張降伏で降伏耐力が決まり，式(22)で評価しており，鋼管の降

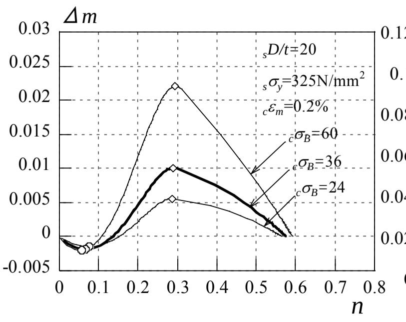


図-10 Δm の値

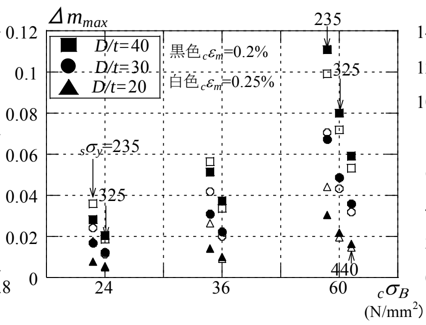


図-11 Δm の最大値 Δm_{max}

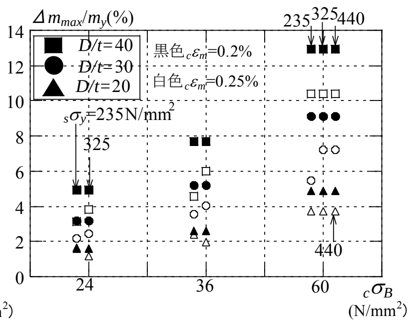


図-12 $\Delta m_{max}/m_y$ の値

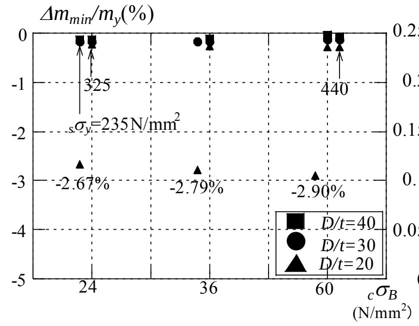


図-13 危険側となる $\Delta m_{min}/m_y$ の値

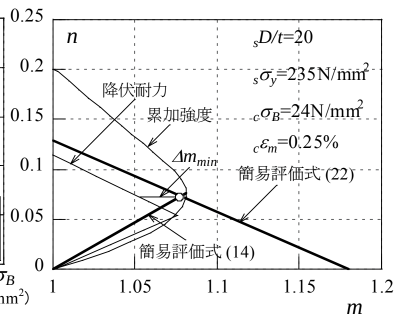


図-14 タイプ B*の m-n 相関関係 ($m \geq 1$ の範囲)

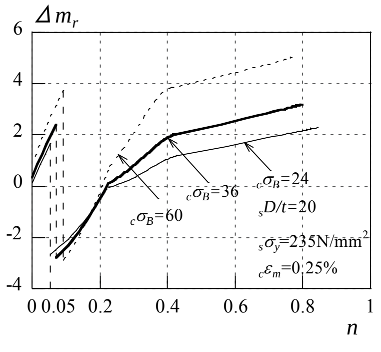


図-15 タイプ B*の Δm_r-n 関係

伏応力度が大きい場合，コンクリートで降伏耐力が決まるので，式(14)で評価しているためである．

図-12によれば$\Delta m_{max}/m_y$に関しては，${}_c\sigma_B$が 60N/mm^2, 幅厚比 ${}_sD/t$ が 40, ${}_c\varepsilon_m$が 0.2%と 0.25%の場合はそれぞれ 13%と 10.4%ほどであり，それ以外はすべて 10%以内に収まっている．ゆえに，本解析パラメータのうち，${}_c\sigma_B$=60N/mm^2, ${}_sD/t$=40 の組み合わせを除けば，簡易評価式は 2 章の降伏耐力を 10%以内の差で評価できる．

c) 危険側の評価となる場合の降伏耐力と降伏耐力計算値の差

次に危険側の評価となる場合について検討する．**図-10** でΔm の値が負となっている範囲における最小値Δm_{min}を○印で示している．m_y に対するΔm_{min}の比$\Delta m_{min}/m_y$を**図-13** に示す．図によれば${}_s\sigma_y$=235 N/mm^2, ${}_sD/t$=20 のときは-2.67%～-2.90%と大きな値となっている，これはすべてタイプ B*の場合であった．タイプ B*以外の場合は$\Delta m_{min}/m_y$の値は-0.03%～-0.27%であった.

図-14 に m の値が 1 より大きい場合のタイプ B*の m-n 関係を例示する．式(14)と式(22)の交点でΔm の値が最小値Δm_{min}となる．**図-15** にタイプ B*の場合のΔm_r-n 関係を示している．図によれば，n の値は 0.05～0.2 の時，Δm_r は負の値となっている．したがって，タイプ B*となる場合は，軸力比が 0.05~0.2 の範囲で危険側の評価となっており，その他のタイプと比べて差が大きい.

(3) 計算例

3 章で示したように，簡易評価式は式(14)のみを用いて降伏耐力を求める場合(タイプ A)と，式(4)と式(22)を両方用いて降伏耐力を算定し，小さい方の値を採用する場合(タイプ B)がある．

本計算例では，${}_c\sigma_B$ =36 N/mm^2, ${}_s\sigma_y$ =235 N/mm^2, ${}_sD/t$ =30, ${}_sD$=600mm, ${}_sE$=2.05×10^{5}N/mm^2, ${}_c\varepsilon_m$ =0.25%の場合について計算する．本計算例はタイプ B であり，タイプの判別方法も示す.

初めに，必要となる諸量，基本的な耐力などを計算する．${}_c\varepsilon_{cr}$＝1.06×10^{-3}, ${}_s\varepsilon_y$＝1.15×10^{-3}, ${}_cN_0$=11300kN, ${}_cM_0$= 6320kN・m, ${}_sN_y$= 10900kN, ${}_sM_y$= 2040kN・m, N_0= 22200kN.

まずm_kの値を求める．式(19)により${}_c\tilde{\varphi}$ を計算すると式(23)のようになる.

$$
\begin{aligned}
{}_c\tilde{\varphi} &= \frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}\left\{1+\sqrt{1-2\left(\frac{1}{3}\cdot\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-1\right)\cdot\frac{{}_s\varepsilon_y}{{}_c\varepsilon_m}\cdot\frac{{}_cN_0}{{}_sN_y}}\right\} \\
&= 0.424\left(1+\sqrt{1+2\left(1-\frac{1}{3}\times 0.424\right)\cdot\frac{1.15\times10^{-3}}{0.0025}\cdot\frac{11300}{10900}}\right) \\
&= 0.996
\end{aligned}
\tag{23}
$$

式(20)より${}_c\tilde{\varepsilon}_0$を計算すると式(24)のようになる.

$$
{}_c\tilde{\varepsilon}_0 = 0.424-\frac{1}{2}\times 0.996 = -0.074 \tag{24}
$$

式(17)より m_kを計算すると式(25)のようになる.

$$
\begin{aligned}
m_k &= \frac{{}_cm\cdot{}_cM_0+{}_sm\cdot{}_sM_y}{{}_sM_y} \\
&= \Big(\frac{1}{4}{}_c\tilde{\varepsilon}_0+\frac{1}{12}{}_c\tilde{\varphi}-\frac{1}{8}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^2-\frac{1}{12}{}_c\tilde{\varepsilon}_0\cdot{}_c\tilde{\varphi} \\
&\quad -\frac{1}{64}{}_c\tilde{\varphi}^2-\frac{1}{3}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^3\cdot\frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}^2}+\frac{1}{12}{}_c\tilde{\varepsilon}_0{}^4\cdot\frac{1}{{}_c\tilde{\varphi}^2}\Big)\cdot\frac{{}_cM_0}{{}_sM_y} \\
&\quad +\frac{1}{2}\cdot\frac{{}_sD}{{}_cD}\cdot\frac{{}_c\varepsilon_m}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_c\tilde{\varphi} \\
&= \Big\{\frac{1}{4}\cdot(-0.074)+\frac{1}{12}\cdot 0.996-\frac{1}{8}\cdot(-0.074)^2 \\
&\quad -\frac{1}{12}\cdot(-0.074)\cdot 0.996-\frac{1}{64}\cdot 0.996^2-\frac{1}{3}\cdot(-0.074)^3\cdot\frac{1}{0.996^2} \\
&\quad +\frac{1}{12}\cdot(-0.074)^4\cdot\frac{1}{0.996^2}\Big\}\cdot\frac{6320}{2040}+\frac{1}{2}\cdot\frac{600}{560}\cdot\frac{0.0025}{1.15\times10^{-3}}\cdot 0.996 \\
&= 1.33
\end{aligned}
\tag{25}
$$

m_k>1 であるから，タイプ B となる.

式(15)より n_kを計算すると式(26)のようになる.

$$
\begin{aligned}
n_k &= \frac{\frac{2}{3}{}_c\sigma_B\cdot{}_cA+{}_sE\cdot{}_c\varepsilon_{cr}\cdot{}_sA}{{}_s\sigma_y\cdot{}_sA+{}_c\sigma_B\cdot{}_cA} \\
&= \frac{\frac{2}{3}\cdot 36\cdot 560^2+2.05\times10^5\cdot 1.06\times10^{-3}\cdot\left(600^2-560^2\right)}{235\cdot\left(600^2-560^2\right)+36\cdot 560^2} \\
&= 0.793
\end{aligned}
\tag{26}
$$

式(14)より n と m_{mod1}の関係は下式となる.

$$
\begin{aligned}
m_{mod1} &= -\frac{m_k}{n_k}n+m_k \\
&= -\frac{1.33}{0.793}n+1.33 \\
&= -1.68n+1.33
\end{aligned}
\tag{27}
$$

また，式(22)より n と m_{mod2}の関係は下式となる.

$$
\begin{aligned}
m_{mod2} &= \frac{N_0\cdot{}_cD}{4\,{}_sM_y}n+1 \\
&= \frac{22200\cdot 0.56}{4\cdot 2040}n+1 \\
&= 1.52n+1
\end{aligned}
\tag{28}
$$

軸力比 n=0.15 のときの降伏耐力 m を求めたい場合，式(14)より計算すると m=1.08, 式(22)より m=1.23 となるので小さい値の m=1.08 を採用する.

$$
M_y = m\cdot{}_sM_y = 1.08\cdot 2040 = 2203\text{kN}\cdot\text{m} \tag{29}
$$

なお，文献 2)の解析方法で求めた降伏曲げモーメント m の値は 1.08, M_yは 2203kN・m で，誤差はなかった.

5. 結論

本研究は簡便に角形CFT柱の降伏耐力を算定できる評価式を提案することを目的とした．得られた知見は下記のとおりである．

1) CFT 断面の降伏耐力は，中立軸の位置と限界状態となる断面部位によって，降伏耐力はタイプ A とタイプ B (タイプ B*)に分けられ，それぞれのタイプに対して簡易評価式を直線式として提案した．
2) 提案した簡易評価式は，今回解析したパラメータの範囲では，${}_c\sigma_B$=60N/mm^2，${}_sD/t$=40 の組み合わせを除けば，簡易評価式による降伏耐力計算値と降伏耐力の差 $\Delta m_{max}/m_y$ は 10%以内で評価できる．
3) 危険側の評価をする場合について，タイプ B*の場合は，危険側となる $\Delta m_{min}/m_y$ の値は-2.67%～-2.90%と比較的大きな値となっていた．タイプ B*以外の場合は $\Delta m_{min}/m_y$ の値は-0.03%～-0.27%であった．

謝辞：本研究の一部は白神航大君(北九州市立大学 4 年生)の卒業研究として行われた．ここに深く感謝します．

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，2008.10.
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.587-594，2009.11.
3) 加藤勉：曲げと圧縮をうけるコンクリート充填鋼管柱の弾性限強さ(コンクリート充填鋼管柱の耐力，変形能力の研究 III)，日本建築学会構造系論文集，第 499 号，pp.131-138，1997.9.
4) Marco MENEGOTTO, Paolo Emilio PINTO: Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, Proc., IABSE Symposium of Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by well Defined Repeated Loads, International Association for Bridge and Structural Engineering, Lisbon, Portugal, Vol. 13, pp.15-22, 1973.

(Received August 30, 2019)

SIMPLIFIED EVALUATION FORMULA FOR CALCULATING THE YIELD STRENGTH OF SQUARE CFT BEAM-COLUMNS

Gang CUI, Masae KIDO and Mao LIU

This study aims to propose a simplified evaluation formula for calculating the yield strength of square concrete-filled steel tubular beam-columns , examine the accuracy of the evaluation formula, and show the applicable range of the formula. When the compressive stress of concrete reached 2/3 of its compressive strength ${}_c\sigma_B$ or when the outermost edge stress of the steel tube reaches the yield stress ${}_s\sigma_y$, the smaller bending moment is considered as the yield bending moment. The yield strengths are categorized as Type A and Type B(Type B*), in which *m*-*n* correlations of yield strength are expressed as a simplified evaluation formula for both types by using linear equations. The proposed simplified evaluation formula can effectively evaluate the yield strength in the range of parameters analyzed in this study. Except for the combination of ${}_c\sigma_B$ = 60 N/mm^2 and ${}_sD/t$ = 40, the yield strength can be evaluated within an error margin of 10%. When the evaluation formula overestimates the accurate yield strength, the error between the strength obtained by the formula and the accurate strength $\Delta m_{min}/m_y$ is from -2.67 to -2.90% in case of Type B*. The value of $\Delta m_{min}/m_y$ is from -0.03 to -0.27% except for Type B.