(42) 円形CFT断面の累加強度と終局強度の比較

薄　拓己[1]・城戸　將江[2]

[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: b0mbb011@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

本研究の目的は，円形CFT断面の終局耐力算定式を提示し，材料強度，鋼管径厚比を現実的な範囲で変化させ，一般化累加強度と終局強度の関係，一般化累加強度と単純累加強度の関係を明らかにすることである．一般化累加強度では，鋼管は降伏応力度で，コンクリートは圧縮強度で全塑性状態になっているとして算定した全塑性モーメントとした．また終局耐力では，コンクリートの圧縮縁がコンクリートの終局ひずみとなるときの曲げ耐力を平面保持の仮定を用いて算定した．一般化累加強度に対する終局強度の比は，終局ひずみが小さく，コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が大きいほど小さくなる．また，一般化累加強度に対する終局強度の比は，コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が小さくなるほど大きくなる．

Key Words : *yield strength, compressive strength, ultimate strain, diameter-thickness ratio, bending moment-axial force relationship*

1. 序論

コンクリート充填鋼管構造は性能の良いことが知られ，近年では超高層ビルから一般のビルまで多く使われている．コンクリート充填鋼管（以下CFT）柱の設計法はコンクリート充填鋼管構造設計施工指針[1)]（CFT指針）に示されている．

CFT短柱の終局耐力は，CFT指針では一般化累加強度で算定することが示されている．また，一般化累加強度のほかには，コンクリートの圧縮縁のひずみが終局ひずみに達すると仮定した曲げ終局強度がある．この方法での耐力算定は土木学会の示方書である文献2) に主として円形CFTに対しその概略が示されているが，算定式は示されていない．このような背景から角形CFT断面の終局耐力算定式が文献3) で示されたが，円形CFT断面については算定式がなく，一般化累加強度と終局耐力の違いは明らかでない．

このような状況の下，本論文では1) CFT断面の終局強度算定式を提示すること，2) 材料強度，鋼管径厚比を現実的に使われる範囲で変化させ，CFT断面一般化累加強度と終局強度の関係を明らかにすること，また，3) 一般化累加強度と単純累加強度の関係を明らかにすることを目的とする．

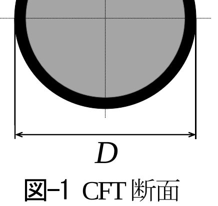


図-1 CFT断面

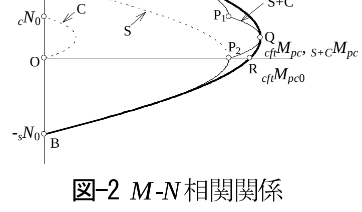


図-2 M-N相関関係

2. 解析

(1) 解析対象

円形CFT断面を対象とする．断面は，図-1に示すように鋼管の断面径をDとし，板厚をt_sとする．

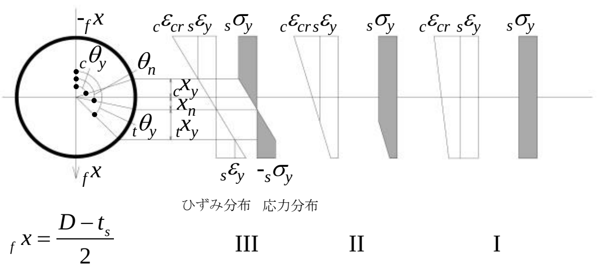
(2) 累加強度による終局耐力

図-2に曲げモーメントM―軸力N相関関係の概略図を示す．図-2の太線は一般化累加強度 $_{cft}M_{pc}$であり，鋼管は降伏応力度 $_s\sigma_y$で，コンクリートは圧縮強度 $_c\sigma_B$で全塑性状態になっているとして算定した全塑性モーメントである．なお，拘束効果は考慮していない．また，SおよびCで示す曲線はそれぞれ鋼管とコンクリートが全塑性状態となったときの強度である．

図-2中細実線で示す単純累加強度 $_{S+C}M_{pc}$は，Cで示すコンクリート部分の耐力線の原点OをP_2に移動させ，Sで示す鋼管部分の耐力線のP_2をP_1に移動させたもので，全体として弧AP_1QP_2Bとなる．また，図-2中 $_{cft}N_0$はCFT柱の圧縮強度であり，鋼管のみの圧縮強度 $_sN_0$，コンクリートのみの圧縮強度 $_cN_0$を累加したものである．

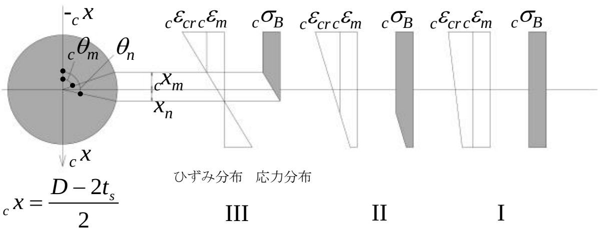
(3) 終局強度式による曲げ強度

コンクリートの圧縮縁のひずみが終局ひずみ $_c\varepsilon_u$とな



$${}_fx=\frac{D-t_s}{2}$$

図-3 鋼管のひずみ分布と応力分布



$${}_cx=\frac{D-2t_s}{2}$$

図-4 コンクリートのひずみ分布と応力分布

るときの曲げモーメント M_u と軸力 N_u を平面保持の仮定を用いて算定する．この曲げ強度を本論文では，SRC規準[4]にならって終局強度式による曲げ強度 M_u と呼ぶ．図-3，図-4にそれぞれ鋼管とコンクリートのひずみ分布と応力分布を示す．なお，終局ひずみ ${}_c\varepsilon_{cr}$ > 鋼管の降伏ひずみ ${}_s\varepsilon_y$（$={}_s\sigma_y/{}_sE$，${}_sE$ は鋼管のヤング係数）の場合を対象とする．

a) 鋼管部分の終局強度

鋼管の応力－ひずみ関係を完全弾塑性型と仮定し，中立軸の位置 x_n を変化させると，ひずみ分布，応力分布は図-3のI～IIIの3種類に分類できる．応力分布に関して，鋼管の負担する軸力 ${}_sN_u$ と曲げモーメント ${}_sM_u$ は式 (1)～(3) となる．

1) 領域 I $\dfrac{{}_cx+\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_fx}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}-1}<x_n$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_sN_u&=2\,{}_s\sigma_y\cdot{}_fx\cdot t_s\cdot\pi\\ {}_sM_u&=0\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

2) 領域 II $\dfrac{-{}_cx+\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_fx}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}+1}<x_n\le\dfrac{{}_cx+\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_fx}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}-1}$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_sN_u&=2\cdot{}_s\sigma_y\cdot{}_fx\cdot t_s\cdot[{}_c\theta_y\\&\quad+\frac{1}{x_n-{}_cx_y}\{(-{}_fx\cdot\sin{}_c\theta_y)+x_n(\pi-{}_c\theta_y)\}]\\ {}_sM_u&=2\cdot{}_s\sigma_y\cdot{}_fx^2\cdot t_s\cdot[\sin{}_c\theta_y\\&\quad+\frac{1}{x_n-{}_cx_y}\{\frac{1}{2}\cdot{}_fx(\pi-{}_c\theta_y-\frac{\sin 2{}_c\theta_y}{2})\\&\quad-x_n\sin{}_c\theta_y\}]\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

3) 領域 III $-{}_cx<x_n\le\dfrac{-{}_cx+\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}\cdot{}_fx}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_s\varepsilon_y}+1}$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_sN_u&=2\cdot{}_s\sigma_y\cdot{}_fx\cdot t_s\cdot[{}_c\theta_y+{}_t\theta_y-\pi\\&\quad+\frac{1}{x_n-{}_cx_y}\{{}_fx(\sin{}_t\theta_y-\sin{}_c\theta_y)\\&\quad+x_n({}_t\theta_y-{}_c\theta_y)\}]\\ {}_sM_u&=2\cdot{}_s\sigma_y\cdot{}_fx^2\cdot t_s\cdot[\sin{}_c\theta_y+\sin{}_t\theta_y\\&\quad+\frac{1}{x_n-{}_cx_y}\{\frac{1}{2}\cdot{}_fx({}_t\theta_y-{}_c\theta_y\\&\quad+\frac{\sin 2{}_t\theta_y}{2}-\frac{\sin 2{}_c\theta_y}{2})\\&\quad+x_n(\sin{}_t\theta_y-\sin{}_c\theta_y)\}]\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

このとき，

$$\left.\begin{aligned}{}_cx_y&=-\frac{{}_fx}{2}\cos({}_c\theta_y)\\ {}_tx_y&=-\frac{{}_fx}{2}\cos({}_t\theta_y)\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式(1)～(4)の ${}_s\sigma_y$ は鋼管の降伏応力度，${}_cx_y$, ${}_tx_y$ はそれぞれ圧縮および引張で降伏応力度となるときの位置，${}_c\theta_y$, ${}_t\theta_y$ はそれぞれ圧縮および引張で降伏応力度となるときの角度である（図-3参照）．

b) コンクリート部分の終局強度

コンクリートの応力―ひずみ関係は圧縮強度に達するまでは直線式を使い，圧縮強度到達後は圧縮強度を保つものとした．コンクリートの応力－ひずみ関係は非線形であるが，本研究では計算を簡単にするために一次式を用いた．参考として付録にコンクリートの応力－ひずみ関係に二次式を用いた場合について示している．圧縮強度時のひずみは ${}_c\varepsilon_m$（$={}_c\sigma_B/{}_cE$，${}_cE$ はコンクリートのヤング係数で RC 規準[5]により計算した）である．中立軸の位置 x_n を変化させると，ひずみ分布，応力分布は図-4の I～III の 3 種類に分類できる．応力分布に関して，コンクリートの負担する軸力 ${}_cN_u$ と曲げモーメント ${}_cM_u$ は式(5)～(7) となる．

1) 領域 I $\dfrac{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}+1}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-1}\cdot{}_cx<x_n$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_cN_u&={}_c\sigma_B\cdot{}_cx^2\cdot\pi\\ {}_cM_u&=0\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

2) 領域Ⅱ ${}_cx < x_n \leq \dfrac{\dfrac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}+1}{\dfrac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-1} \cdot {}_cx$ のとき

$$\left.\begin{aligned}
{}_cN_u &= {}_c\sigma_B \cdot {}_cx^2 \cdot [{}_c\theta_m - \frac{1}{2}\sin 2{}_c\theta_m \\
&\quad + \frac{2}{x_n - {}_cx_m}\{-\frac{1}{3}\cdot {}_cx\sin^3 {}_c\theta_m \\
&\quad + \frac{x_n}{2}(\pi - {}_c\theta_m + \frac{1}{2}\sin 2{}_c\theta_m)\}] \\
{}_cM_u &= 2{}_c\sigma_B \cdot {}_cx^3 \cdot [\frac{1}{3}\sin^3 {}_c\theta_m \\
&\quad + \frac{1}{x_n - {}_cx_m}\{\frac{1}{8}\cdot {}_cx(\pi - {}_c\theta_m + \frac{1}{4}\sin 4{}_c\theta_m) \\
&\quad - \frac{1}{3}x_n \sin^3 {}_c\theta_m\}]
\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

3) 領域Ⅲ $-{}_cx < x_n \leq {}_cx$ のとき

$$\left.\begin{aligned}
{}_cN_u &= {}_c\sigma_B \cdot {}_cx^2 \cdot [{}_c\theta_m - \frac{1}{2}\sin 2{}_c\theta_m \\
&\quad + \frac{2}{x_n - {}_cx_m}\{\frac{1}{3}\cdot {}_cx(\sin^3\theta_n - \sin^3 {}_c\theta_m) \\
&\quad + \frac{x_n}{2}(\theta_n - {}_c\theta_m - \frac{1}{2}\sin 2\theta_n + \frac{1}{2}\sin 2{}_c\theta_m\}] \\
{}_cM_u &= 2{}_c\sigma_B \cdot {}_cx^3 \cdot [\frac{1}{3}\sin^3 {}_c\theta_m \\
&\quad + \frac{1}{x_n - {}_cx_m}\cdot\{\frac{1}{8}{}_cx(\theta_n - {}_c\theta_m - \frac{1}{4}\sin 4\theta_n + \frac{1}{4}\sin 4{}_c\theta_m) \\
&\quad + \frac{1}{3}x_n(\sin^3\theta_n - \sin^3 {}_c\theta_m)\}]
\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

このとき,

$${}_cx_m = -\frac{{}_cx}{2}\cos({}_c\theta_m) \quad (8)$$

式(5)〜(8)の ${}_c\sigma_B$ はコンクリートの圧縮強度, ${}_cx_m$ は圧縮強度時のひずみに達する位置, ${}_c\theta_m$ は圧縮強度となるときの角度である（図-4 参照）.

c) CFT 断面の終局強度

CFT 断面の終局強度 N_u, 終局曲げ強度 M_u は式 (1) ~ (3) の鋼管断面の強度, 式 (5) ~ (7) のコンクリート断面の強度において, 中立軸 x_n を同じ値に取った ${}_sN_u, {}_sM_u, {}_cN_u, {}_cM_u$ を累加することで算定する.

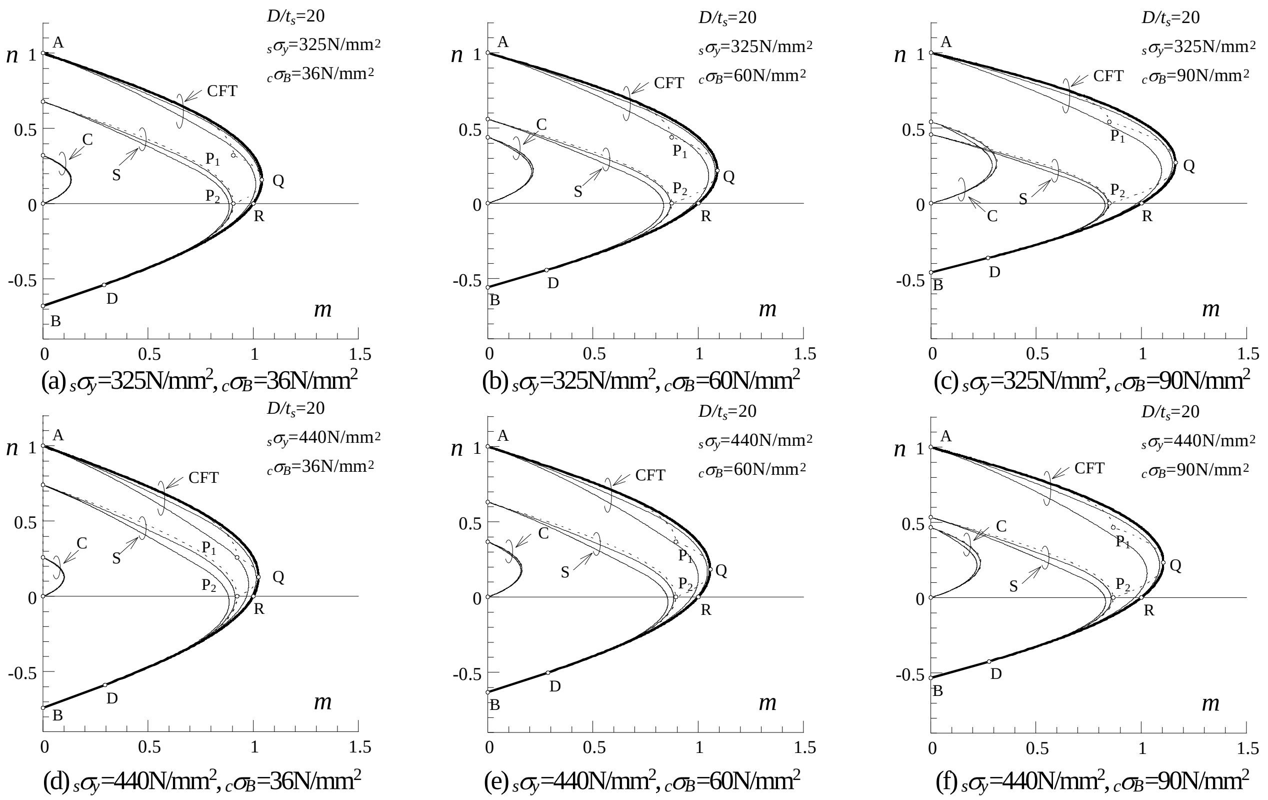
3. 解析結果と考察

(1) 解析変数

解析変数と選んだ値は次のとおりである.

1) 径厚比 D/t_s (20 , 60 , 100)
2) 鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ (325 , 440 N/mm^2)
3) コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ (36 , 60 , 90 N/mm^2)
4) コンクリートの終局ひずみ ${}_c\varepsilon_{cr}$ (0.004 , 0.008)

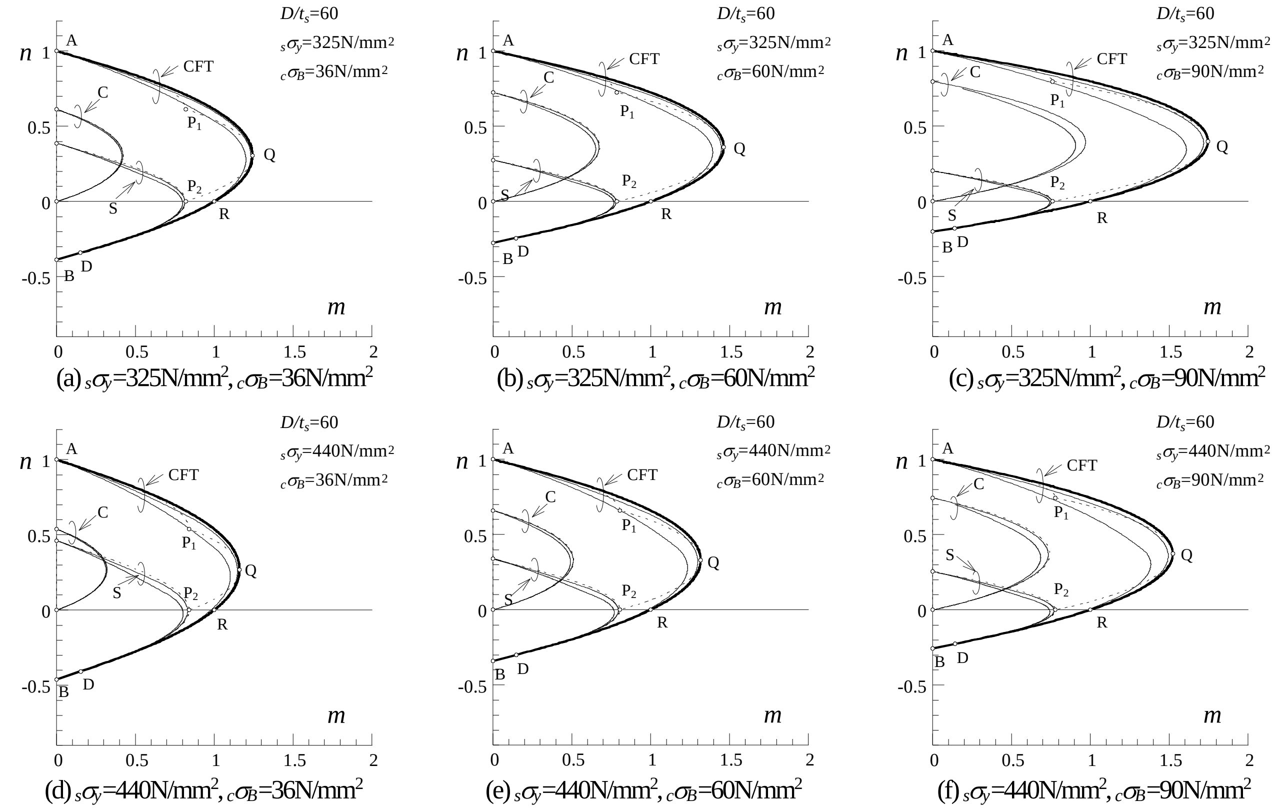
径厚比 D/t_s は, CFT指針[1]では, 上限値が D/t =100となっており, その範囲内で3段階の径厚比を選択した. 鋼管の降伏応力度 ${}_s\sigma_y$ はよく使われている鋼材のF値の325, 440N/mm^{2}によるものである. また, コンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_B$ は, CFT指針[1]にある上限値の90N/mm^{2}以下とした.



(a) ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2, ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2 (b) ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2, ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2 (c) ${}_s\sigma_y$=325N/mm^2, ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2

(d) ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2, ${}_c\sigma_B$=36N/mm^2 (e) ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2, ${}_c\sigma_B$=60N/mm^2 (f) ${}_s\sigma_y$=440N/mm^2, ${}_c\sigma_B$=90N/mm^2

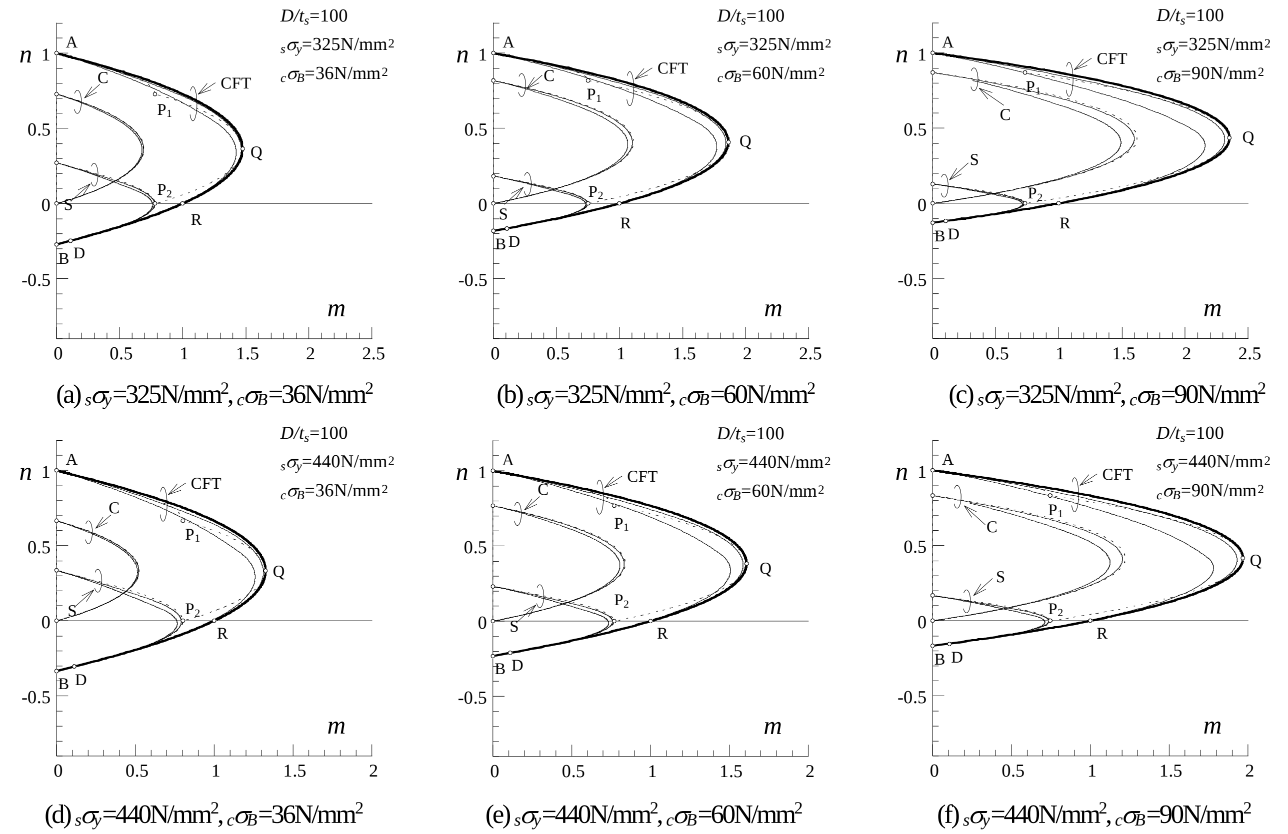
図-5 m-n 相関関係 (D/t_s=20)



(a) ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=36N/mm²　(b) ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=60N/mm²　(c) ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=90N/mm²

(d) ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=36N/mm²　(e) ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=60N/mm²　(f) ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=90N/mm²

図-6 m-n 相関関係 (D/t_s=60)



(a) ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=36N/mm²　(b) ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=60N/mm²　(c) ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=90N/mm²

(d) ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=36N/mm²　(e) ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=60N/mm²　(f) ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=90N/mm²

図-7 m-n 相関関係 (D/t_s=100)

(2) 曲げモーメントー軸力相関関係

図-5～図-7 に無次元曲げモーメント m ー無次元軸力 n 相関関係を示す．無次元曲げモーメント m は曲げモーメント(${}_{cft}M_{pc}$, ${}_{s+c}M_{pc}$, M_u, ${}_sM_u$, ${}_cM_u$)を一般化累加強度において軸力が0の場合の曲げモーメント ${}_{cft}M_{pc0}$ で，無次元化軸力 n は軸力(N_u, ${}_sN_u$, ${}_cN_u$)を ${}_{cft}N_0$ で無次元化したものである．

図中の“CFT”で囲んだ4本の直線はCFT断面の耐力で，太実線で一般化累加強度 $_{cft}M_{pc}$，点線で単純累加強度 $_{s+c}M_{pc}$を，細い実線で原点に近いものは終局ひずみ $_c\varepsilon_r$ =0.004，遠いものは $_c\varepsilon_r$=0.008として計算した終局強度 M_u である．

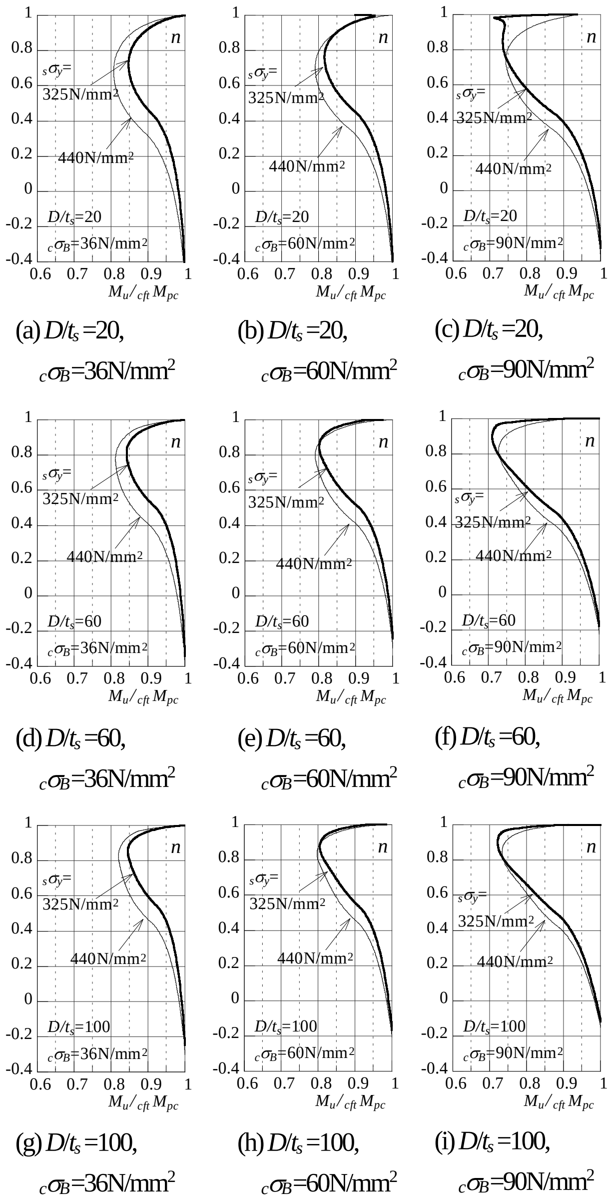
図-5〜図-7中に示す最大曲げモーメントとなるQ点の m_Q はコンクリートの圧縮強度および，径厚比が最小で，鋼管の降伏応力度が最大のときに最も小さく（図-5(d)），その値は1.03であった．また，コンクリートの圧縮強度および径厚比が最大で，鋼管の降伏応力度が最小のときに m_Q が最も大きくなり（図-7(c)），その値は2.35であった．したがって， コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が大きいほど，軸力が0の場合の曲げモーメント $_{cft}M_{pc0}$ と最大曲げモーメント（点Q）の差が大きくなると考えられる．

また，図-7(a)と図-7(d)のように，鋼管の降伏応力度のみ異なるもの，図-7(a)と図-7(c)のように，コンクリートの圧縮強度のみ異なるものを比較すると，降伏応力度 $_s\sigma_y$ および，コンクリートの圧縮強度 $_c\sigma_B$ が大きいほど，終局ひずみ $_c\varepsilon_r$ = 0.004の終局強度と $_c\varepsilon_r$ = 0.008の終局強度の差が大きくなっていることが観察される．したがって，鋼管の降伏応力度，コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど，終局ひずみ $_c\varepsilon_r$ の大きさの違いが終局強度 M_u に及ぼす影響が大きくなることがわかる．

(3) 一般化累加強度と終局強度

図-8, 図-9にそれぞれ終局ひずみ $_c\varepsilon_r$ を0.004, 0.008としたときの一般化累加強度 $_{cft}M_{pc}$ に対する終局強度 M_u の比 $M_u/_{cft}M_{pc}$ と軸力比 n の関係で鋼管の降伏応力度をパラメータとしたものを示す．図中太実線は $_s\sigma_y$ = 325N/mm^2 の場合を，細実線は $_s\sigma_y$ = 440N/mm^2 の場合を示す．

図-8より，コンクリートの圧縮強度 $_c\sigma_B$ = 36N/mm^2 のとき，軸力比のすべての値において，$M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は鋼管の降伏応力度 $_s\sigma_y$ が大きいほど小さくなり，$_c\sigma_B$ = 90N/mm^2

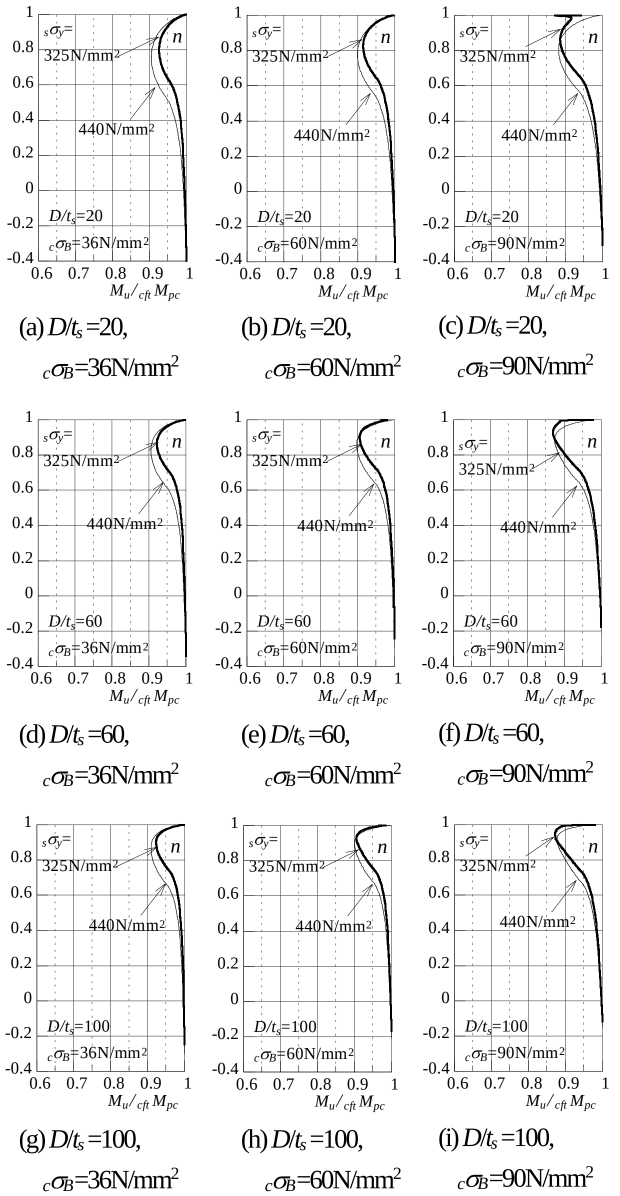


(a) D/t_s=20, $_c\sigma_B$=36N/mm^2 (b) D/t_s=20, $_c\sigma_B$=60N/mm^2 (c) D/t_s=20, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

(d) D/t_s=60, $_c\sigma_B$=36N/mm^2 (e) D/t_s=60, $_c\sigma_B$=60N/mm^2 (f) D/t_s=60, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

(g) D/t_s=100, $_c\sigma_B$=36N/mm^2 (h) D/t_s=100, $_c\sigma_B$=60N/mm^2 (i) D/t_s=100, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

図-8 $M_u/_{cft}M_{pc}$-n 相関関係 ($_c\varepsilon_r$=0.004)



(a) D/t_s=20, $_c\sigma_B$=36N/mm^2 (b) D/t_s=20, $_c\sigma_B$=60N/mm^2 (c) D/t_s=20, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

(d) D/t_s=60, $_c\sigma_B$=36N/mm^2 (e) D/t_s=60, $_c\sigma_B$=60N/mm^2 (f) D/t_s=60, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

(g) D/t_s=100, $_c\sigma_B$=36N/mm^2 (h) D/t_s=100, $_c\sigma_B$=60N/mm^2 (i) D/t_s=100, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

図-9 $M_u/_{cft}M_{pc}$-n 相関関係 ($_c\varepsilon_r$=0.008)

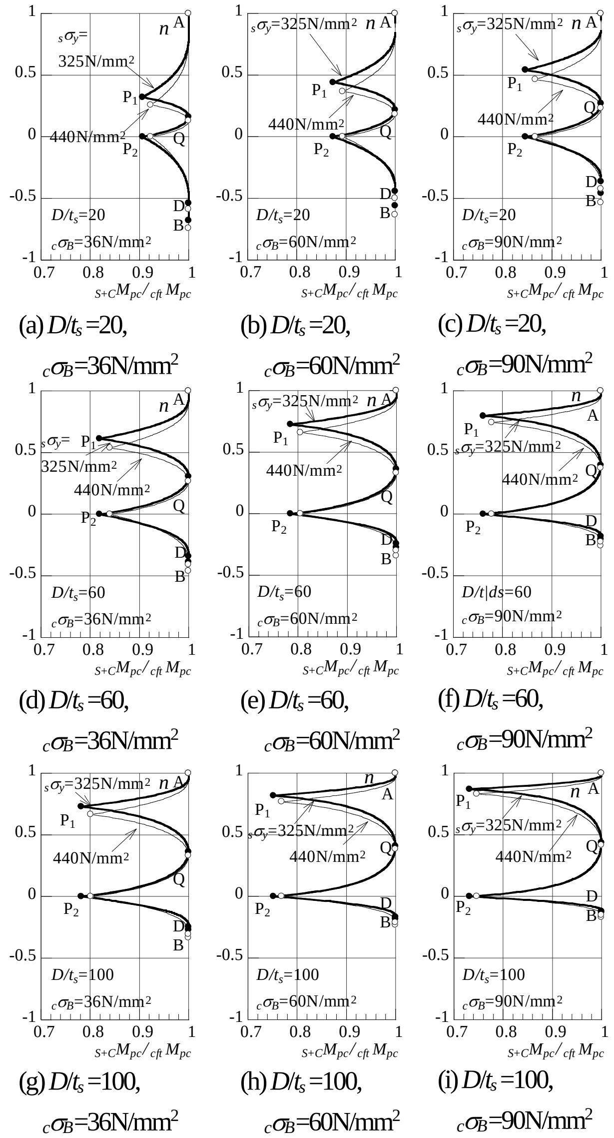
のとき，軸力比が0.8程度以下では $M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は鋼管の降伏応力度が大きいほど小さくなっている．終局ひずみが0.004の場合には，CFT指針での適用範囲の上限である $_s\sigma_y$ = 440N/mm^2 のとき，$M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は最小0.73程度になる（図-8(f)）．図-9より，終局ひずみが0.008では，降伏応力度が 440N/mm^2 のとき，$M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は最小で0.87程度となる（図-9(i)）．また，解析変数のうち，径厚比のみ異なるものを比較すると，軸力比が0.8程度以下で，径厚比が小さいほど $M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は小さく，コンクリートの圧縮強度のみ異なるものを比較すると，コンクリートの圧縮強度が大きいほど，$M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は小さくなっている．したがって，終局ひずみが小さく，コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が大きいほど，$M_u/_{cft}M_{pc}$ の値は小さくなる．

(4) 一般化累加強度と単純累加強度

図-10に一般化累加強度 $_{cft}M_{pc}$に対する単純累加強度 $_{s+C}M_{pc}$の比 $_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$ と軸力比 n の関係で，鋼管の降伏応力度をパラメータとしたものを示す．図中太実線は $_s\sigma_y$ =325N/mm^{2}の場合を，細実線は $_s\sigma_y$ =440N/mm^{2}の場合を示す．図中の点 A , B , D , P$_1$, P$_2$, Q は図-5〜図-7に示したm −n 関係上に示した点 A , B , D , P$_1$, P$_2$, Q と対応している．

図-10より，A 点，Q 点，BD 間では一般化累加強度と単純累加強度は等しい．その他の部分では，鋼管の降伏応力度 $_s\sigma_y$ が大きくなるほど，コンクリートの強度 $_c\sigma_B$ および径厚比 D/t_s が小さいほど比 $_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$ は1に近いこと，すなわちコンクリート部分が耐力に及ぼす影響が小さくなるほど $_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$ は大きくなる．これは，角形鋼管の場合[3]と同様の傾向を示している．

比 $_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$ の値は，図中でP$_1$, P$_2$ で示す部分で最小値を取る．この点は曲げモーメント－軸力相関関係上では，図-2 や図-5〜図-7にP$_1$, P$_2$ で示す点で，軸力 N が0および $_cN_0$（コンクリートのみの圧縮耐力）の点である．幅厚比が20で降伏応力度が325N/mm^2 の場合，コンクリートの圧縮強度がそれぞれ36, 60, 90N/mm^2 に対して，$_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$ は0.91, 0.87, 0.85となる．同様に幅厚比が100の場合は0.78, 0.75, 0.73となる．幅厚比が100でコンクリートの圧縮強度が90N/mm^2 で単純累加強度は一般化累加強度に対して30%程度小さめの耐力を与えることとなる．



(a) D/t_s =20, $_c\sigma_B$=36N/mm^2　(b) D/t_s =20, $_c\sigma_B$=60N/mm^2　(c) D/t_s =20, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

(d) D/t_s =60, $_c\sigma_B$=36N/mm^2　(e) D/t_s =60, $_c\sigma_B$=60N/mm^2　(f) D/t_s =60, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

(g) D/t_s =100, $_c\sigma_B$=36N/mm^2　(h) D/t_s =100, $_c\sigma_B$=60N/mm^2　(i) D/t_s =100, $_c\sigma_B$=90N/mm^2

図-10 $_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$-$n$ 相関関係

4. 結論

円形CFT断面の終局耐力に対して，終局曲げ強度 M_u の算定式を提示し，一般化累加強度と終局曲げ強度の関係および一般化累加強度と単純累加強度の関係を検討した．径厚比 D/t_s (20, 60, 100), 鋼管の降伏応力度 $_s\sigma_y$ (325, 440N/mm^2), コンクリートの圧縮強度 $_c\sigma_B$ (36, 60, 90N/mm^2), 終局ひずみ $_c\varepsilon_r$ (0.004, 0.008) を解析変数に選んで累加強度および終局強度を算定し，解析変数の曲げ強度に及ぼす影響を調べた．得られた知見を以下に示す．

1) コンクリートの終局ひずみを与え，平面保持の仮定を用いた終局強度算定式を式 (1)〜(3), 式 (5)〜(7) のように提示した．
2) 曲げモーメント－軸力相関関係から鋼管の降伏応力度，コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど，終局ひずみ $_c\varepsilon_r$ の大きさの違いが終局強度 M_u に及ぼす影響は大きくなる．
3) 一般化累加強度と終局強度を比較すると，一般化累加強度 $_{cft}M_{pc}$ に対する終局強度 M_u の比 $M_u/_{cft}M_{pc}$ は，終局ひずみが0.004の場合にはCFT指針での適用範囲の上限である降伏応力度が440N/mm^{2}のとき，値は最小0.73程度になる．終局ひずみが0.008では降伏応力度が440N/mm^{2}のときは最小で0.87程度となる．
4) 一般化累加強度 $_{cft}M_{pc}$ に対する単純累加強度$_{s+C}M_{pc}$ の比 $_{s+C}M_{pc}/_{cft}M_{pc}$ は，コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が小さくなるほど大きくなる．

今後は，拘束効果を考慮した場合や，より妥当な終局ひずみの検討を行っていきたいと考えている．

謝辞：本研究は科研費（課題番号19K04715）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・同解説，2008.10
2) 日本土木学会：2014 年制定複合構造標準示方書，2015.5
3) 城戸將江，津田惠吾：角形 CFT 断面の累加強度と終局強度の比較，日本建築学会構造系論文集，第 85 巻，第 777 号，pp.1503-1512，2020.11
4) 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，2001.3
5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018.12

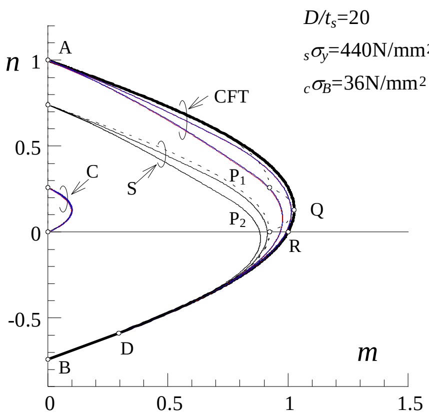
付録　コンクリートの応力ーひずみ関係が二次式の場合

コンクリートの応力ーひずみ関係を二次式と仮定して解析したものについて示す．

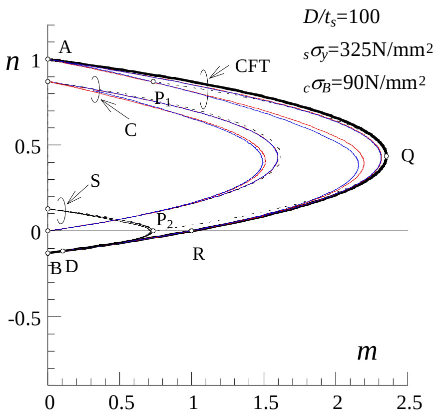
コンクリートの応力${}_c\sigma$ーひずみ${}_c\varepsilon$ 関係は式(付.1)とした．コンクリート部分の引張強度はないものとする．

$$\left.\begin{aligned}\frac{{}_c\sigma}{{}_c\sigma_B}&=1-\left(1-\frac{{}_c\varepsilon}{{}_c\varepsilon_m}\right)^2 && ({}_c\varepsilon\le{}_c\varepsilon_m)\\ \frac{{}_c\sigma}{{}_c\sigma_B}&=1 && ({}_c\varepsilon_m\le{}_c\varepsilon)\end{aligned}\right\}\qquad(付.1)$$

上式の ${}_c\sigma_B$ はコンクリートの圧縮強度で，${}_c\varepsilon_m={}_c\sigma_B/{}_cE$ とした．鋼管の応力ーひずみ関係は完全弾塑性型とした．上式を用いた場合の，コンクリートの負担する軸力 ${}_cN_u$ と曲げモーメント ${}_cM_u$ は，式 (付.2) ～式 (付.4) となる．



付図-1 mーn 相関関係 (D/t_s=20, ${}_s\sigma_y$=440N/mm², ${}_c\sigma_B$=36N/mm²)



付図-2 mーn 相関関係 (D/t_s=100, ${}_s\sigma_y$=325N/mm², ${}_c\sigma_B$=90N/mm²)

1) 領域 I $\dfrac{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}+1}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-1}\cdot{}_cx<x_n$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_cN_u&={}_c\sigma_B\cdot\pi\cdot{}_cx^2\\ {}_cM_u&=0\end{aligned}\right\}\qquad(付.2)$$

2) 領域 II ${}_cx<x_n\le\dfrac{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}+1}{\frac{{}_c\varepsilon_{cr}}{{}_c\varepsilon_m}-1}\cdot{}_cx$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_cN_u={}&{}_c\sigma_B\cdot{}_cx^2[\frac{1}{({}_cx_m-x_n)^2}\cdot\{\frac{x_n^2-2{}_cx_m\cdot x_n}{2}\cdot\\&(\pi-{}_c\theta_m+\frac{1}{2}\sin2{}_c\theta_m)+\frac{2{}_cx_m\cdot{}_cx}{3}\cdot\sin^3{}_c\theta_m\\&-\frac{{}_cx^2}{8}(\pi-{}_c\theta_m+\frac{1}{4}\sin4{}_c\theta_m)\}\\&+{}_c\theta_m-\frac{1}{2}\sin2{}_c\theta_m]\\{}_cM_u={}&{}_c\sigma_B\cdot{}_cx^3[\frac{1}{({}_cx_m-x_n)^2}\cdot\\&\{-\frac{x_n^2-2x_n\cdot{}_cx_m-{}_cx^2}{3}\cdot\sin^3{}_c\theta_m\\&-\frac{{}_cx^2}{5}\cdot\sin^5{}_c\theta_m+\frac{{}_cx\cdot{}_cx_m}{4}(\pi-{}_c\theta_m+\frac{1}{4}\sin4{}_c\theta_m)\}\\&-\frac{2}{3}\sin^3{}_c\theta_m]\end{aligned}\right\}\qquad(付.3)$$

3) 領域 III $-{}_cx<x_n\le{}_cx$ のとき

$$\left.\begin{aligned}{}_sN_u={}&{}_c\sigma_B\cdot{}_cx^2\cdot[\frac{1}{({}_cx_m-x_n)^2}\{\frac{x_n^2-2{}_cx_m\cdot x_n}{2}\cdot\\&(\theta_n-{}_c\theta_m-\frac{1}{2}\sin2\theta_n+\frac{1}{2}\sin2{}_c\theta_m)\\&-\frac{2{}_cx_m\cdot{}_cx}{3}(\sin^3\theta_n-\sin^3{}_c\theta_m)\\&-\frac{{}_cx^2}{8}(\theta_n-{}_c\theta_m-\frac{1}{4}\sin4\theta_n+\frac{1}{4}\sin4{}_c\theta_m)\}\\&+{}_c\theta_m-\frac{1}{2}\sin2{}_c\theta_m]\\{}_cM_u={}&{}_c\sigma_B\cdot{}_cx^3\cdot[\frac{1}{({}_cx_m-x_n)^2}\cdot\{\frac{x_n^2-2x_n\cdot{}_cx_m-{}_cx^2}{3}\cdot\\&(\sin^3\theta_n-\sin^3{}_c\theta_m)+\frac{{}_cx^2}{5}(\sin^5\theta_n-\sin^5{}_c\theta_m)\\&+\frac{{}_cx\cdot{}_cx_m}{4}(\theta_n-{}_c\theta_m-\frac{1}{4}\sin4\theta n+\frac{1}{4}\sin4{}_c\theta_m)\}\\&-\frac{2}{3}\sin^3{}_c\theta_m]\end{aligned}\right\}\qquad(付.4)$$

上式で用いた記号はすべて，本文の式 (5) ～ (7) と同じである．

付図-1, 付図-2に無次元曲げモーメント m －無次元軸力 n 相関関係を示す．図中の“CFT”で囲んだ6本の直線はCFT断面の耐力で，太実線で一般化累加強度 ${}_{cft}M_{pc}$，点線で単純累加強度 ${}_{s+c}M_{pc}$を，赤色の細実線で原点に近いものは終局ひずみ ${}_{c}\varepsilon_{r}$=0.004，遠いものは ${}_{c}\varepsilon_{r}$=0.008として二次式によって計算した終局強度 M_u, 青色の細実線で原点に近いものは終局ひずみ ${}_{c}\varepsilon_{r}$=0.004，遠いものは ${}_{c}\varepsilon_{r}$=0.008として一次式によって計算した終局強度 M_uである．また，付図-1はコンクリートの圧縮強度と径厚比が最小で，鋼管の降伏応力度が最大の場合（コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が最も小さい変数の組み合わせ）であり，付図-2はコンクリートの圧縮強度と径厚比が最大で，鋼管の降伏応力度が最小の場合（コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が最も大きい変数の組み合わせ）である．

付図-1では終局ひずみが0.004, 0.008の場合どちらも，コンクリートの応力－ひずみ関係が一次式と二次式で，大きな変化が見られなかったが，付図-2では，終局ひずみが0.008では一次式と二次式で大きく変わらないが，0.004では二次式のほうが一般化累加強度に近づくことが観察される．このことから，コンクリート部分が耐力に及ぼす影響が大きい試験体では，終局ひずみを小さめに設定した場合，コンクリートの応力－ひずみ関係が一次式のときよりも二次式のときのほうが近くなる．

(Received September 10, 2021)

COMPARISON BETWEEN SUPERPOSED STRENGTH AND ULTIMATE FLEXURAL STRENGTH OF CIRCULAR CFT SECTION

Takumi SUSUKI and Masae KIDO

The purposes of this study are to present the expressions for calculating the ultimate flexural strength of a circular CFT section, to clarify the relationship between the generalized superposed strength and ultimate flexural strength, and to clarify the relationship between the generalized superposed strength and simple superposed strength. The ratio of the ultimate flexural strength to the generalized superposed strength becomes smaller when the ultimate strain is small and the influence of the concrete part on the bearing capacity is large. The ratio of the simple superposed strength to the generalized superposed strength becomes larger as the influence of the concrete portion on the bearing capacity becomes smaller.