

論文

[2100] 鋼管コンクリート柱における鋼とコンクリートの分担力に関する実験

佐藤孝典*1, 金本清臣*1

1. はじめに

高層建築の柱部材として近年頻繁に用いられる鋼管コンクリート構造(以下CFTと略す)は、その耐力が現行のSRC規準値よりもはるかに高くなることが数多く報告されている^(1,2)。しかしながら、鋼管(以下Sと略す)とコンクリート(以下Cと略す)の力の分担割合については、筆者らが数年前に報告した⁽³⁾以外は全く報告されておらず、合理的な設計式が今のところ得られていない。

そこで、本論文においては、CFTにおけるSの分担力およびCの分担力を独自の「変形経路再現実験」により、局部座屈するSおよびコンファインド効果と支圧効果を受けるCの材料特性を明確にしようとするものである。さらに、部材のヒンジ長さとして局部座屈を分析するために、本実験にはレーザー変位計を組み込んだ独自の計測方法が採用されているが、本論文ではその詳細は割愛する。

2. 変形経路再現実験

2.1 実験概要

CFTにおけるSの分担力およびCの分担力を把握するために図-1に示すような独自の「変形経路再現実験」を開発した。同一素材から成るCFTとSとCの3種類の試験体を用意し、まずCFTに一定軸力下における曲げせん断加力を行う。その後、CFTで発生した変形経路(軸変位 δ_N , 回転角 θ)と全く同じものを変形制御加力でSとCそれぞれに与える。そのとき、発生した力を分析してそれぞれの分担力(軸力N, 曲げモーメントM)を求める。

実験のパラメータは、軸力比 N/N_0 だけである。軸力および水平力の加力に際しては、変形制御の可能なアクチュエーターを用いた。変形計測に際しては通常の変位計とは別に、レーザー変位計を組み込んだ計測方法で、約6000点の変位を同時測定することができた。

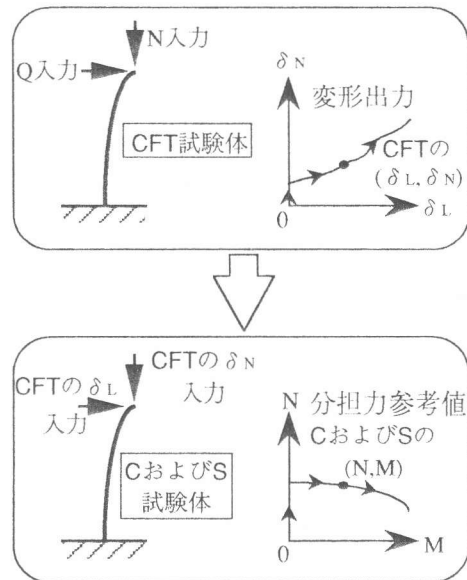


図-1 変形経路再現実験

2.2 試験体

試験体は、CFT、S、Cの3体1組になっており、その詳細は図-2に示すとおりである。S試験体は、CFTに内在するSを模擬しようとした鋼管単体である。また、C試験体は、CFTに内在するCを模擬しようとするために、CFT試験体のヒンジゾーンにレーザー切断により図-3に示すようなスリットを設けて円周方向のみに鋼管が抵抗するようにした。しかしながら、S試験体はコンクリートのコンファインド効果に寄与している円周方向応力成分が模擬できておらず、C試験体はヒンジゾーンで鋼管が既に曲げモーメントを分担していることを模擬できていないことを

*1清水建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

断しておく。

試験体パラメータは、CFT、S、Cのそれぞれについての軸力比のみで $N/N_0=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ である。試験体一覧を表-1に示す。

使用鋼管は、STK400相当の材質で公称直径 $\phi 318.5\text{mm}$ 、公称板厚 7.9mm の円形鋼管である。すべての鋼管は、溶接加工後に残留応力除去の目的で焼鈍した。JISに基づく引張試験によると、降伏強度は $s\sigma_y=3298\text{kgf/cm}^2$ で、破断強度は $s\sigma_u=4646\text{kgf/cm}^2$ で、硬化域での2次勾配は $Eh=1/133E_0$ (降伏点と3%ひずみ点との割線剛性) である。C試験体の鋼管には、図-3に示すように円周方向にスリットを千鳥状に設けており、軸方向剛性 K_z は円周方向剛性 K_θ の約 $1/125$ になっている。使用コンクリートは、粗骨材の最大寸法が 20mm のレディミックスコンクリートで、水セメント比 W/C は 52% 、単位セメント量は 347kg/m^3 、スランプは 18cm である。JISに基づいた $\phi 100 \times h 200\text{mm}$ のテストピースを用いた圧縮試験によると、圧縮強度は $c\sigma_B=373\text{kgf/cm}^2$ で、初期ヤング係数は $E_c=3.16 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ である。その試験材令は、柱試験体の加力と合わせた。

コンクリートは、鋼管内部に3層に分けて縦打ち、各層毎に十分な締め固めを行った。C試験体における円周方向にスリットには、コンクリートが目詰まりしないように、前もってパラフィンを充填しておいた。コンクリート打設面の上端はセメントペーストでキャッピングし、軸力が鋼管とコンクリートの両方に同時に導入されるようにした。

2.3 加力方法

実験概要でも述べたとおり、本実験では図-1に示すような独自の「変形経路再現実験」が行われている。まず、親に相当するCFTの試験体は、一定軸力下における曲げせん断加力を行う。すると、図-4に示すような軸変位-回転角関係が得られる。次に、子に相当するS、Cの試験体は、その軸変位-回転角関係を忠実にトレースするように変形制御加力を行う。すると、S、Cの試験体はCFT試験体に内在するS、Cと同一の挙動を再現したこと

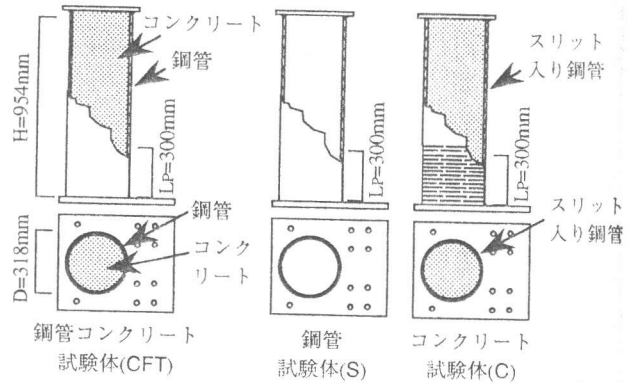


図-2 試験体詳細

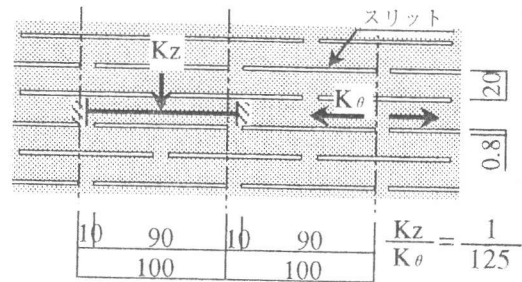


図-3 鋼管スリットの詳細

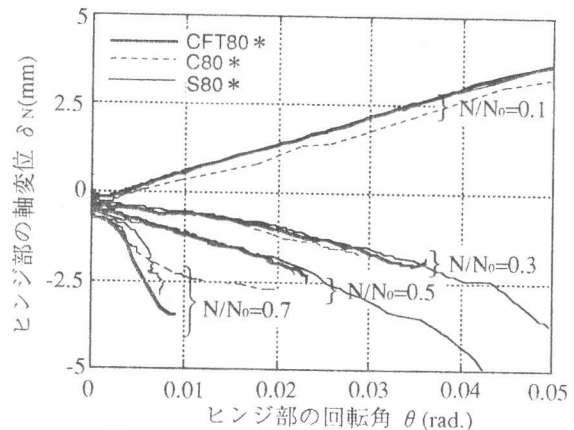


図-4 再現した軸変位-回転角関係

表-1 試験体一覧

名称	タイプ	直径 D (mm)	高さ H (mm)	H/D	板厚 t (mm)	D/t	軸力	
							N (tf)	N/N ₀
CFT801	コンクリート	318	954	3.0	7.69	41.4	51.6	0.1
CFT803							154.8	0.3
CFT805							258.0	0.5
CFT807							361.2	0.7
C801	スリット入り鋼管	318	954	3.0	7.69	41.4	26.8	0.1
C803							80.4	0.3
C805							134.0	0.5
C807							187.6	0.7
S801	鋼管単体	318	954	3.0	7.69	41.4	24.7	0.1
S803							74.1	0.3
S805							123.5	0.5
S807							172.9	0.7

ここで、 $N_0=c\sigma_B \cdot A_c + s\sigma_y \cdot A_s$

になり、そこに発生した力を分析してそれぞれの分担力(軸力 N 、曲げモーメント M)を求める。なお、制御する軸変位(δ_N)と回転角(θ)は、部材耐力を決定するヒンジゾーン(下端から300mmの区間)の測定値を採用している。ヒンジが形成されると、この300mmの区間では軸ひずみ(ϵ_p)および曲率(ϕ_p)の分布形が均一化することを想定している。

加力装置は図-5に示すとおりで、試験体には軸力と水平力をアクチュエーターによって入力でき、摩擦抵抗による余分な力が作用しないようにアクチュエーターは両端ピンで接合した。なお、大変形時にはスタブが回転および水平鉛直移動して加力端に曲げモーメントが発生するが、データ処理に際してそれらを考慮した。

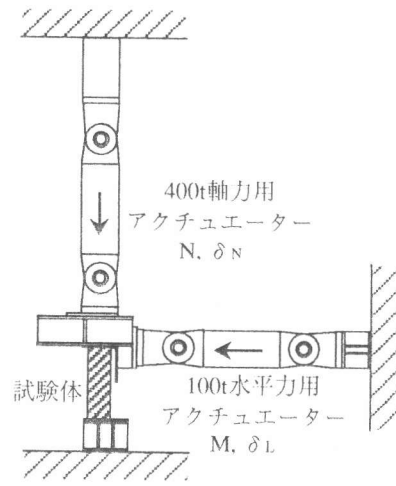


図-5 加力装置

2.4 計測方法

本実験では、通常の変位計以外に図-6に示すようなレーザー変位計を組み込んだ独自の計測方法で、“高精度のたわみ形状”および“局部座屈の三次元曲面”を測定を行った。この計測装置は、レーザー変位計とリニアモジュールとデータサンプリング器を組み合わせたものであるが、その詳細は本論文では割愛する。

ヒンジゾーンの軸変位(δ_N)と回転角(θ)を計測する4個の変位計は、下端から300mm上がった位置の鋼管側面に貫通穴を設けてコンクリートもしくは鋼管にアンカーした治具に設置した。3軸ひずみゲージは、ヒンジゾーンのウェブ面と引張フランジ面の3レベルに合計6枚を鋼管に貼付した。軸力および水平力は、アクチュエーターにセットされたロードセルで計測した。

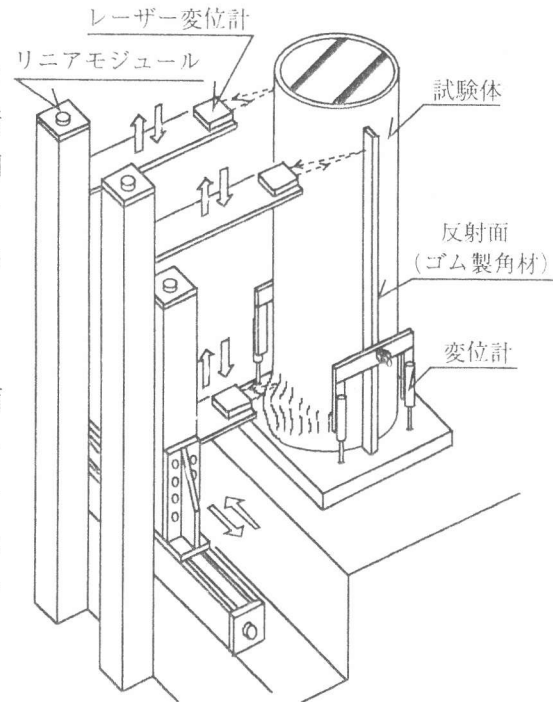


図-6 計測装置

3. 実験結果

3.1 分担力の推移

試験体S、Cは試験体CFTに内在するそれらを完全に模擬できていないので、試験体S、Cで発生した力がそのまま試験体CFTにおける分担力にならない。CFTの鋼管には、円周方向応力(σ_θ)と軸方向応力(σ_z)の両方が発生している。しかし、Cの鋼管には円周方向応力(σ_θ)だけが発生し、Sの鋼管には軸方向応力(σ_z)だけが発生している。CFTにおいては、円周方向応力(σ_θ)はコンファインド効果としてCの分担力に寄与し、軸方向応力(σ_z)はそのままSの分担力に寄与する。

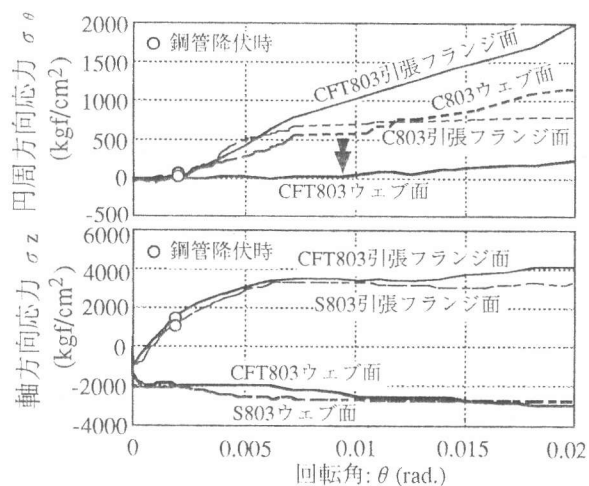


図-7 鋼管応力の推移(N/N₀=0.3)

そこで、鋼管応力を比較することによって、CFTにおけるS、Cの分担力を求める。図-7に、ヒンジゾーンの中央高さレベルのウェブ面と引張フランジ面の鋼管に貼付した3軸ひずみゲージから算出した円周方向応力(σ_θ)と軸方向応力(σ_z)の推移を $N/N_0=0.3$ の場合を例に示す。回転角 $\theta=0.002\text{rad}$.以降で円周方向応力(σ_θ)が増加開始し、CはSからのコンファインド効果を受けている。引張フランジ面の円周方向応力(σ_θ)は、降伏後ではCFT803とC803とは同等に比較できない。ウェブ面は弾性範囲にあり、CFT803の円周方向応力(σ_θ)はC803の約5%~15%に低減している(矢印)。そこで、回転角 $\theta=0.002\text{rad}$.以降でのCFTにおけるCの分担力(N_c, M_c)は、試験体Cに生じた力(N_c', M_c')をウェブ面の円周方向応力(σ_θ)で低減した式(1)で評価する。

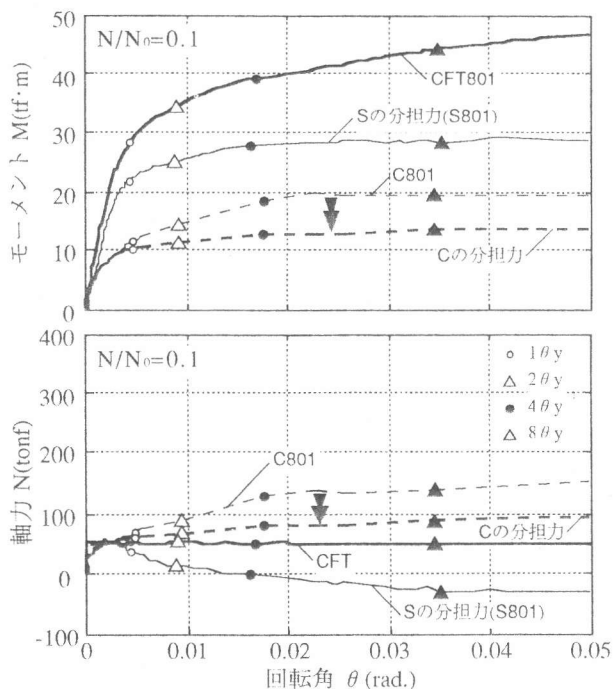


図-8 分担力の推移($N/N_0=0.1$)

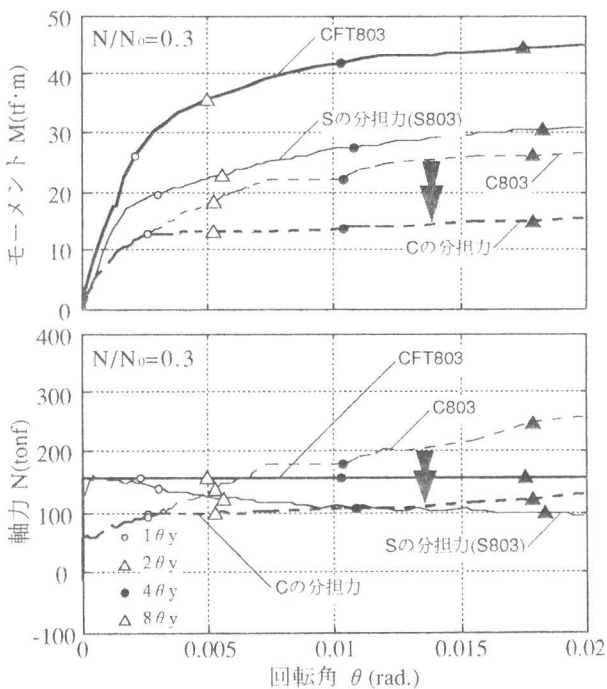


図-9 分担力の推移($N/N_0=0.3$)

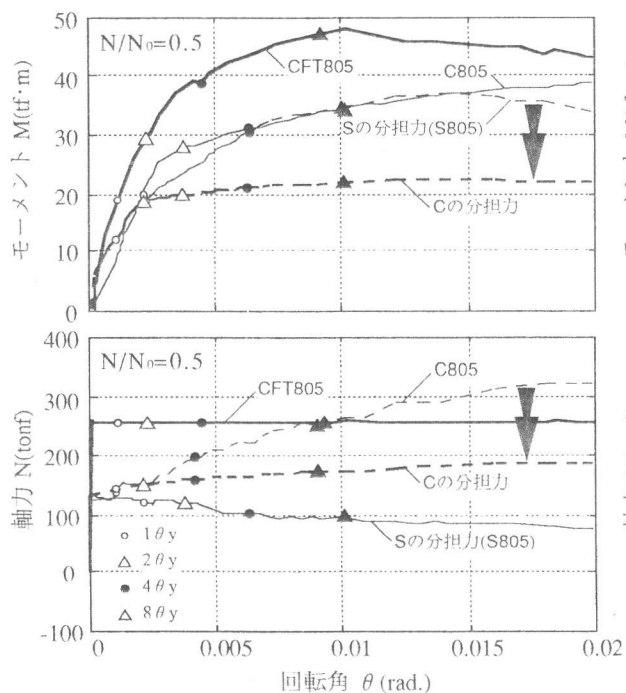


図-10 分担力の推移($N/N_0=0.5$)

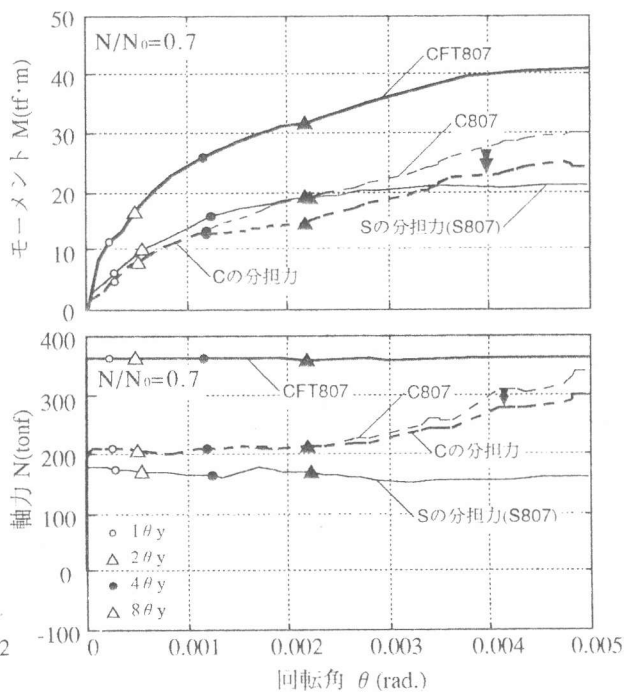


図-11 分担力の推移($N/N_0=0.7$)

$$\begin{Bmatrix} N_c \\ M_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N'_{cin} \\ M'_{cin} \end{Bmatrix} + \frac{\sigma_{\theta CFT}}{\sigma_{\theta C}} * \begin{Bmatrix} N'_c - N'_{cin} \\ M'_c - M'_{cin} \end{Bmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 N'_{cin}, M'_{cin} : 円周方向応力 (σ_{θ}) の増加開始時の力
 $\sigma_{\theta CFT}, \sigma_{\theta C}$: 試験体 CFT, C における円周方向応力

また、軸方向応力 (σ_z) は CFT803 と S803 はほぼ一致しており、この程度の円周方向応力 (σ_{θ}) はほとんど軸方向応力 (σ_z) に影響しないことを示している。よって、CFT における S の分担力 (N_s, M_s) は試験体 S に生じた力 (N'_s, M'_s) をそのまま用いることができる。

以上の補正前後の C の分担力、S の分担力、CFT のモーメント-回転角関係、軸力-回転角関係を軸力比 $N/N_0=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ の順に図-8 ~ 図-11 に示す。縦軸のモーメントおよび軸力は部材下端の値であり、横軸の回転角 (θ) はヒンジゾーンに相当する部材下端から 300mm 上がりでの値である。図中の $1\theta_y, 2\theta_y, 4\theta_y, 8\theta_y$ は、試験体 CFT の 3 軸ひずみゲージより判定した鋼管降伏時の回転角 ($1\theta_y$) の倍々の変形時を示す。図-10 の軸力比 $N/N_0=0.5$ の場合以外は、モーメントおよび軸力ともにほぼ CFT=S の分担力+C の分担力となり、CFT におけるそれぞれの推移がよく分かる。

3.2 N-M 関係における分担力

SRC 規準においては、CFT の終局耐力は S および C の全塑性耐力をベクトル和して求めることが規定されている。その際、材料本来の強度が変わらない限り、理論的には S、C それぞれは、全塑性耐力を越えない。

そこで、軸力-モーメント関係を軸力比 $N/N_0=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ の順に図-12 ~ 図-15 に示す。図中に、S および C の全塑性耐力曲線、それらをベクトル和した CFT の終局耐力曲線も示す。S は局部座屈しない降伏強度 (σ_y)、C はコンクリートの圧縮強度 ($c\sigma_B=373\text{kgf/cm}^2$) に基づいている。そして、参考に文献(4)によるコンファインド効果を考慮したコンクリートの圧縮強度 ($f_c=491\text{kgf/cm}^2$) に基づいた全塑性耐力曲線も示す。

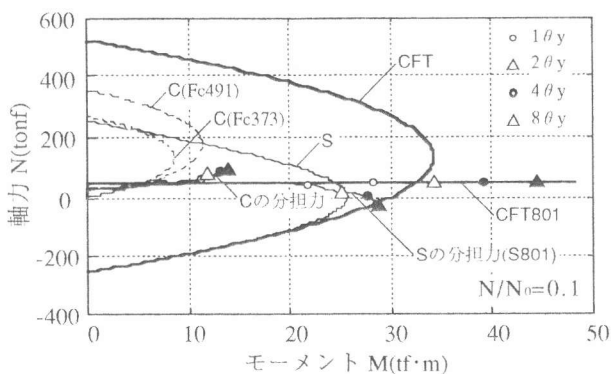


図-12 N-M関係における分担力($N/N_0=0.1$)

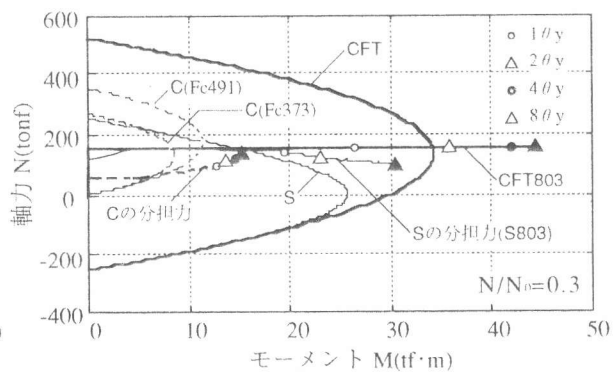


図-13 N-M関係における分担力($N/N_0=0.3$)

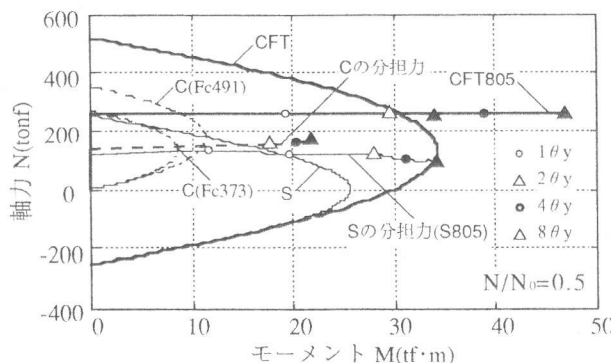


図-14 N-M関係における分担力($N/N_0=0.5$)

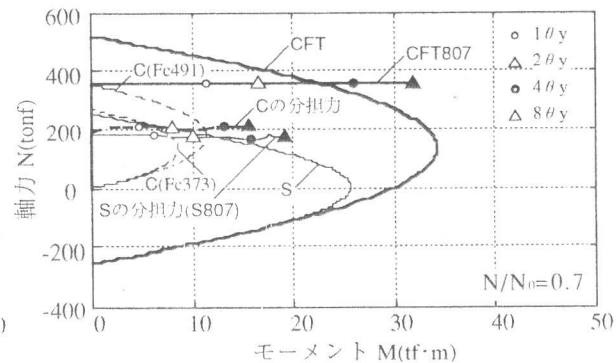


図-15 N-M関係における分担力($N/N_0=0.7$)

SおよびCの分担力をそれぞれの全塑性耐力曲線と比べると、Sはほぼ $2\theta y \sim 4\theta y$ 時に全塑性耐力に到達し停留するが、Cはコンファインド効果を考慮したものさえも大幅に上回る。これは、明かに鋼管によるコンファインド効果と支圧効果のために、コンクリート強度が大幅に増大していることを示している。

4. コンクリートの応力-ひずみ-偏心距離関係

「3.2 N-M関係における分担力」で述べたように、コンクリートは鋼管によるコンファインド効果と支圧効果の影響を大きく受けている。そこで、図-16に示すようなN-M関係上で、Cの分担力($N/N_0=0.5$ の例)の各実験ステップにおけるストレスブロックの応力(σ)と、その合応力位置の偏心距離(e)を求める。ストレスブロックの形状はSRC規準の終局耐力算定用と同じ矩形である。また、そのときのひずみ(ϵ)は、ヒンジゾーンでの平均軸ひずみ(ϵ_p)と平均曲率(ϕ_p)と偏心距離(e)を用いた式(2)で算出される。

$$\epsilon = \epsilon_p + e \cdot \phi_p \quad \text{----- (2)}$$

図-17に、C801, C803, C805, C807のすべての実験ステップから求めた応力-ひずみ-偏心距離関係を示す。応力は、ひずみよりも偏心距離に大きく依存し、 $3000\text{kgf/cm}^2 \sim 4000\text{kgf/cm}^2$ にも達する。これは、数年前に報告したもの⁹⁾とほぼ同じ結果である。CFTのコンクリートの応力-ひずみ関係には、鋼管の板厚で決まるコンファインド効果だけでなく、偏心距離(e)で決まる支圧効果の影響が非常に大きい。

5. まとめ

独自の「変形経路再現実験」によって、CFTにおけるSとCの分担力を実験的に把握することができた。その結果、コンクリートの応力-ひずみ関係には、偏心距離で決まる支圧効果の影響が非常に大きいことが分かった。

<参考文献>

- (1) 佐藤孝典, 中村康一, 黒瀬行信, 渡辺泰志: 「充填鋼管コンクリート柱に関する研究 (その4) 円形断面の軸力曲げせん断実験」 日本建築学会大会梗概集, pp.1619-1620, 1989. 4
- (2) 富井政英, 崎野健治: 「充てんコンクリート鋼管構造に関する研究の現状、その1. 部材の弾塑性性状」 コンクリート工学, Vol.13, No.2, pp.26-40, 1975.2
- (3) 佐藤孝典, 齊藤豊, 鈴木計夫, 遠藤博: 「合成構造(鋼管RC柱)における各構成要素ごとの"分担力抽出法"の提案」 コンクリート工学年次論文報告集12-2, pp.41-46, 1990
- (4) 佐藤孝典: 「円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化」 日本建築学会構造系論文報告集, 第452号, pp.149-158, 1993. 10

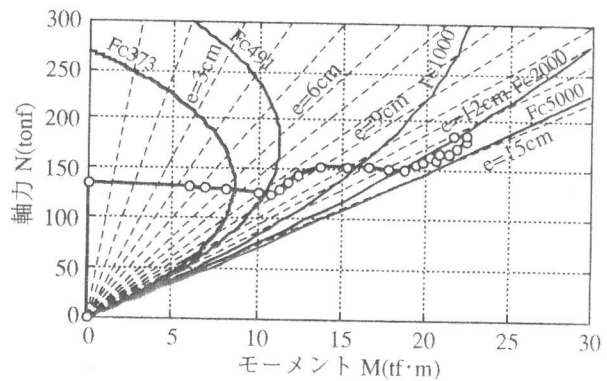


図-16 偏心距離とコンクリート応力($N/N_0=0.5$)

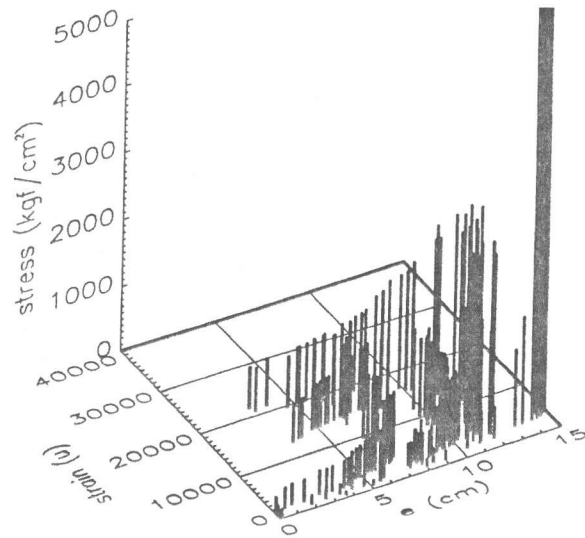


図-17 コンクリートの応力-ひずみ-偏心距離関係