

一定軸力下で繰り返し曲げモーメントを受ける 角形CFT柱の弾塑性性状

中原 浩之

Elasto-Plastic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns under a Constant Gravity Load and Cyclic Bending Moment

Hiroyuki NAKAHARA

An experimental and analytical study on the flexural behavior of concrete filled square steel tubular (CFT) beam-columns is presented. The structural system using the CFT members is guaranteeing the efficient seismic resistant performance in extensive amount of experimental studies of CFT beam-columns. However, flexural behavior of CFT columns excluding the influence of the shearing force has not been tested adequately, because most structural members subjected to axial load are also subjected to combined shearing force and bending moment in practice. Due to the large shearing capacity of the CFT beam-columns, they predominantly fail in flexure. It is, therefore, important to investigate their inelastic flexural behavior from a more basic standpoint.

Tests are carried out on eleven CFT specimens subjected to monotonic and cyclic uniform bending and a constant gravity load in order to clarify the flexural behavior of CFT columns. The load carrying capacity and ductility of square CFT beam-columns are discussed, comparing the test results and elasto-plastic analysis based on the proposed stress-strain relationships established for the confined concrete and for locally buckling steel tubes. The practical analysis using the models well traced the characteristic of the test results. This may show utility of the proposed stress-strain model for predicting the behavior of square CFT beam-columns.

Key Words: Square CFT Beam-Column, Elasto-Plastic Behavior,
Uniform Bending, Stress-Strain Relationship Model

1. はじめに

コンクリート充填鋼管（CFT）は、軸剛性、曲げ剛性が高く、実際の構造ではある程度の長さを持つ柱材として用いられることが多いと考えられる。この為、CFT柱に関してはせん断挙動よりも曲げ挙動が支配的となり、曲げ挙動の把握が重要である。一般の建築構造物における柱材は、軸力・曲げモーメント・せん断力の複合応力を受けるが、曲げ降伏破壊をおこす材の耐力および変形性状を明らかにするには、破壊が集中するヒンジ領域の弾塑性性状に関する詳しい検討が必要である。そこで、本研究では、曲げ降伏する柱材のヒンジ領域の性状を、等曲げを受ける短柱に置き換えて考察できるものとして

実験を行った。実験は、角形CFT柱の崩壊現象に関する基礎的な資料を得ることを目的として、11体の角形断面を持つCFT短柱試験体を作成し、一定軸力下における繰り返し等曲げ加力を行った。載荷の方法は漸増振幅繰り返しと大振幅一回繰り返しの2通りで、鋼管の幅厚比、軸力比を変数とした実験を行い、曲げ性状に関して考察した。また、本論では、これらの実験結果と著者らが既に提案している応力-ひずみ関係のモデル¹⁾を用いた解析の結果を比較して、提案モデルの妥当性についての検討も行った。

2. 試験体および実験装置

試験体は、Fig. 1に示す200×200×600mmの正方形断面を持つ短柱であり、試験体には400×440×22mmのエンドプレートを上下に溶接して取り付けている。鋼管は、4枚の鋼板をコーナー部で溶接して製作し、エンドプレー

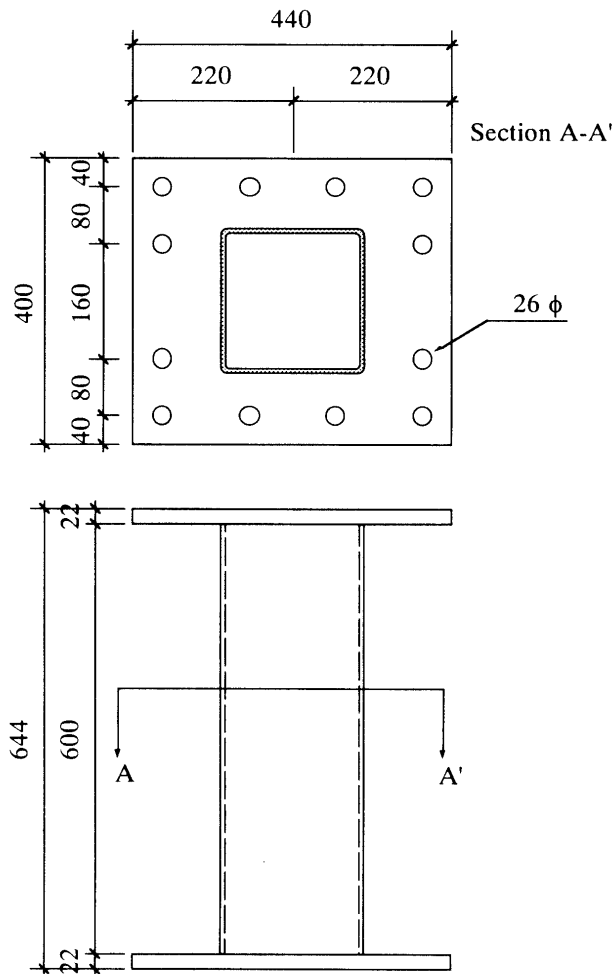


Fig. 1 Test Specimen (Unit: mm)

トを取り付けた後、残留応力を除去するために焼鈍を施した。実験に使用した加力装置および測定装置を Fig. 2 に示す。実験では、まず軸力を設定値（一定軸力）まで載荷し、それから曲げモーメントを載荷した。一定軸力は 5 MN 油圧試験機により蒲鋒形球座を介して載荷し、曲げモーメントは試験体両端のエンドプレートに取り付けた加力ビームを二つの 200kN 油圧ジャッキで押し引きすることにより載荷した。また、曲げモーメントを加えるに生じる付加軸力は、5 MN 試験機による載荷軸力を調整することで軸力が一定となるようにした。

試験体中央部の検長 400mm 間の平均曲率は、測定リング⑩に取り付けた変位計⑬により測定した。なお、測定リングは試験体にボルトを押し付けて固定している。この実験では、曲げにより生じる水平方向のたわみにより、軸力による付加曲げが生じる。この付加曲げを測定するため、上下の蒲鋒形球座の回転中心を結んだ線から検長両端の断面中心を結んだ線までの水平変位⑮を測定した。また、この測定装置⑪では、試験体が縮む、または伸びることにより、水平変位を測定する変位計を固定してい

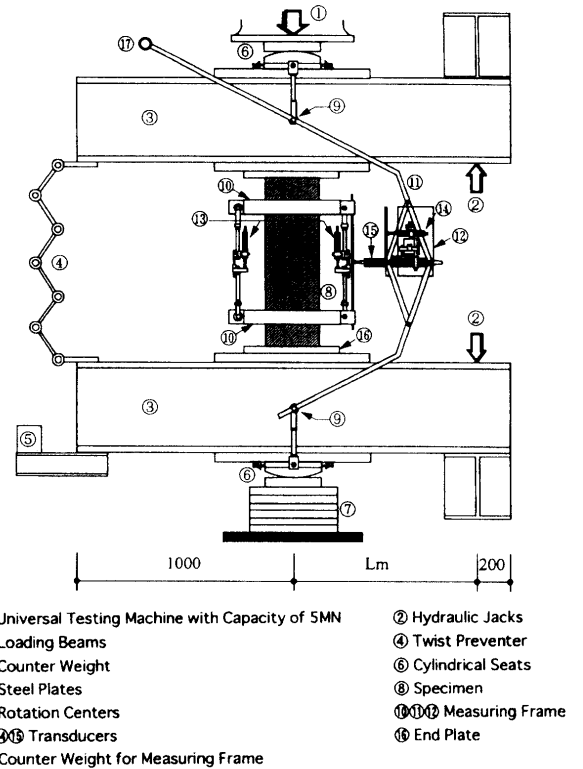


Fig. 2 Loading Apparatus and Measuring Frame (Unit: mm)

るフレーム⑪が移動するので、このフレームの移動量を⑭に示す変位計で測定した。また、図には示していないが、上下の蒲鋒形球座の回転中心⑨間をワイヤーで結び、変形量を巻き取り式変位計（Wire pot）で計測した。

3. 実験結果

本研究の実験は、ヒンジ領域における曲げ性状を調べることを目的とした、CFT 短柱の等曲げ実験であるが、著者が調べた限り、このような実験例は少ない。そこで、本実験の資料は、CFT 部材にとって標準的なものとする必要があると考えられるため、一般の CFT 部材に用いられると考えられる材料強度の組み合わせとして鋼管は 400MPa 級鋼、コンクリートの計画強度は 50MPa とした試験体を作成した。実験のパラメーターは鋼管の幅厚比と軸力比と載荷プログラムである。試験体の一覧を実験で得られた最大曲げ耐力 M_{exp} と共に Table 1 に示す。幅厚比は 33.7, 47.1, 98.0 の 3 種類で、軸力比は 0.2 と 0.4 の 2 種類である。コンクリートのシリンダー強度は 47.6MPa であった。鋼管の降伏強度 σ_y は、焼鈍を施した 1 号 A 試験片の引張試験から得た値である。Fig. 3 に、載荷プログラムを示す。図の実線は大振幅一回繰返しで、点線が漸増振幅繰返しでの載荷履歴を示している。大振幅一回繰返し載荷実験は、単調載荷実験

Table 1 Experimental Variables and Test Results

Specimen	B (mm)	t (mm)	B/t	σ_y (MPa)	σ_B (MPa)	N (kN)	N/N ₀	M _{exp} (kN-m)	M _{exp} /M _{cal}
BRA4-6-5-02	200	5.93	33.7	320	47.6	570	0.18	143	0.991
BRA4-6-5-04	200	5.93	33.7	320	47.6	1140	0.36	144	1.001
BRA4-4-5-02	200	4.25	47.1	211	47.6	426	0.17	87.7	1.026
BRA4-4-5-04	200	4.25	47.1	211	47.6	851	0.35	95.7	1.026
BRA4-2-5-02	200	2.04	98.0	253	47.6	380	0.17	62.7	1.001
BRA4-2-5-04	200	2.04	98.0	253	47.6	761	0.34	69.1	0.932
BRA4-6-5-02-C	200	5.93	33.7	320	47.6	570	0.18	147	1.016
BRA4-6-5-04-C	200	5.93	33.7	320	47.6	1140	0.36	142	0.987
BRA4-4-5-04-C	200	4.25	47.1	211	47.6	851	0.35	91.9	0.984
BRA4-2-5-02-C	200	2.04	98.0	253	47.6	380	0.17	63.5	1.015
BRA4-2-5-04-C	200	2.04	98.0	253	47.6	761	0.34	71.5	0.965

B : width of steel tube, t : wall thickness of steel tube, σ_y : yield stress of steel tube, σ_B : strength of concrete cylinder, N : applied axial load, N₀ : nominal squash load, M_{exp} : maximum experimental moment, M_{cal} : full plastic moment

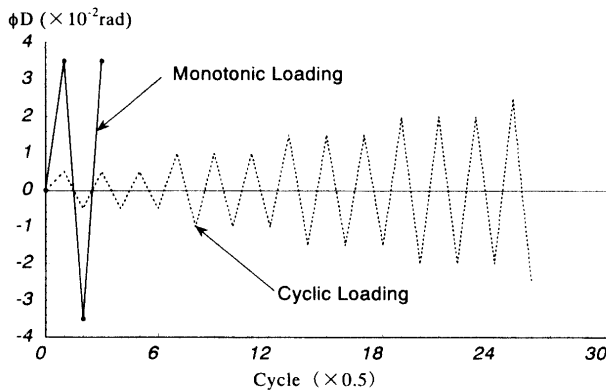


Fig. 3 Deformation History

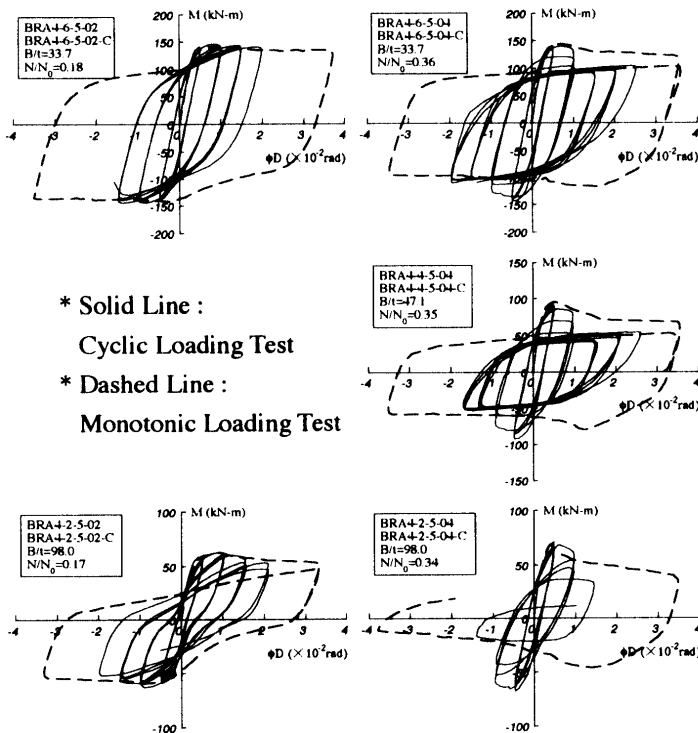


Fig. 4 M-ϕD Relations

(Push Over) としての情報を含めるために、Fig. 2 の加力装置で可能な最大の振幅で載荷を行った。Table 1 で試験体名に-Cがついているものは、漸増振幅繰り返し載荷の実験試験体である。M_{exp} は、正側加力の際に観測された試験体中央断面の最大曲げモーメントで、軸力による付加曲げを含んでいる。表の M_{cal} は、全塑性耐力を示しているが、幅厚比が98.0の試験体を除いて、概ね M_{exp} は M_{cal} で推定可能であることが分かる。

Fig. 4 は、漸増振幅繰り返し載荷と大振幅一回繰り返し載荷実験から得られた曲げモーメント-無次元化曲率関係 (M-ϕD 関係) を示している。図の縦軸 M は、試験体中央断面の曲げモーメントで、横軸は検長区間内の平均曲率 ϕ に断面せい D をかけた無次元化曲率 ϕD である。一つの図には、同一のパラメータを持つ試験体の漸増振幅繰り返し載荷実験を実線で示し、太破線で大振幅一回繰り返し載荷実験の M-ϕD 関係を示しており、載荷方法の違いによる影響を比較している。また、図の左側は、軸力比が0.2の実験結果、右側が軸力比が0.2の実験結果を示しており、幅厚比が小さい試験体の順に上から配置している。軸力比が0.2の試験体に関しては、幅厚比に関わらず耐力低下が少ない安定した挙動を示しており、漸増振幅繰り返し載荷実験の包絡線と大振幅一回繰り返し載荷実験の結果がほぼ一致していることが分かる。一方、軸力比が0.4の場合、幅厚比の影響が顕著で、繰り返し数や、変形の増大に伴い耐力が劣化する脆性的な挙動を示している。しかしながら、幅厚比が最も大きな BRA4-2-5-04-C を除き、大変形時に曲げ耐力がある一定値に収まる現象が観測される。これは、CFT 部材特有の現象で、数多く行われている軸力とせん断力を加力した実験においても観察することができる。また、軸力比が0.4の場合の載荷方法の違いによる影響をみ

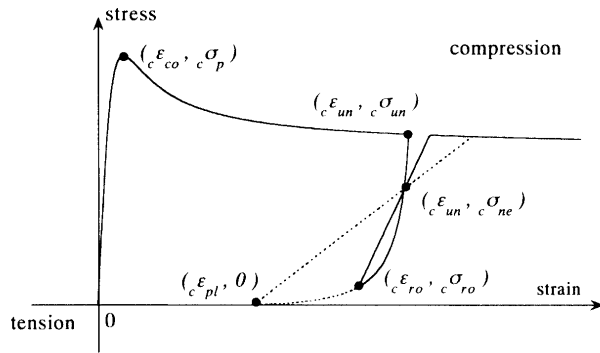


Fig. 5 Stress-Strain Relation for Concrete

ると、負側の最大耐力と最大耐力時の曲率は両者で異なるが、漸増振幅繰り返し載荷実験において一定値に安定する曲げモーメントは大振幅一回繰り返し載荷実験の結果とほぼ一致している。このことから、角形CFT柱の繰り返し等曲げ性状に関しては、大振幅一回繰り返し載荷実験の結果から漸増振幅繰り返し実験の結果をほぼ予測できると言える。履歴吸収エネルギーの観点からは、幅厚比が小さいものの挙動が鉄骨部材のそれに近い紡錘形の履歴挙動を示すのに対して、幅厚比が大きいものの挙動はピンチング現象を伴うRC部材のそれに近く、両者の違いは顕著に観測された。

4. 解析仮定

著者らは、文献¹⁾において、合計48体の角形CFT柱の中心圧縮実験に基づき、充填コンクリートおよび鋼管の材軸方向と断面において平均的な応力-ひずみ関係のモデルを提案した。本研究では、この応力-ひずみ関係を用いて等曲げを受ける角形CFT柱の実験挙動を解析的に予測する事を試みた。解析は通常の断面分割法で行い、解析に用いた仮定は以下の通りである。

- 1) 断面形保持
- 2) 平面保持
- 3) 充填コンクリートの引張応力は無視する
- 4) 充填コンクリートの繰り返し応力-ひずみ関係は Fig. 5 に示すものとする
- 5) 鋼管の繰り返し応力-ひずみ関係は Fig. 6 に示すものとする

Fig. 5 に示す応力-ひずみ関係のモデルの包絡線は文献¹⁾で提案したものであるが、等曲げ解析の場合は文献¹⁾のモデルにおける最大耐力後の負勾配部分の傾きを2/3倍して用いている。文献¹⁾で定式化した応力-ひずみ関係は中心圧縮実験の結果に基づくものであるため、曲げ実験に対する解析では断面

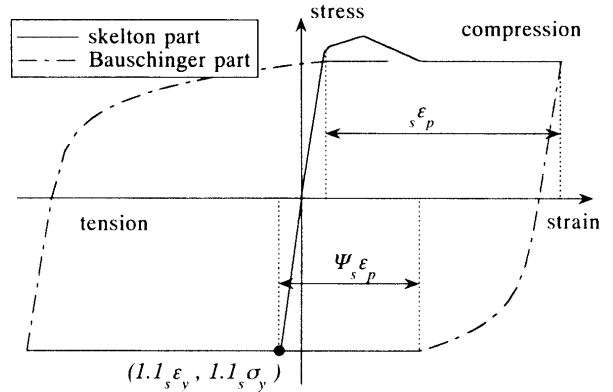


Fig. 6 Stress-Strain Relation for Steel Tube

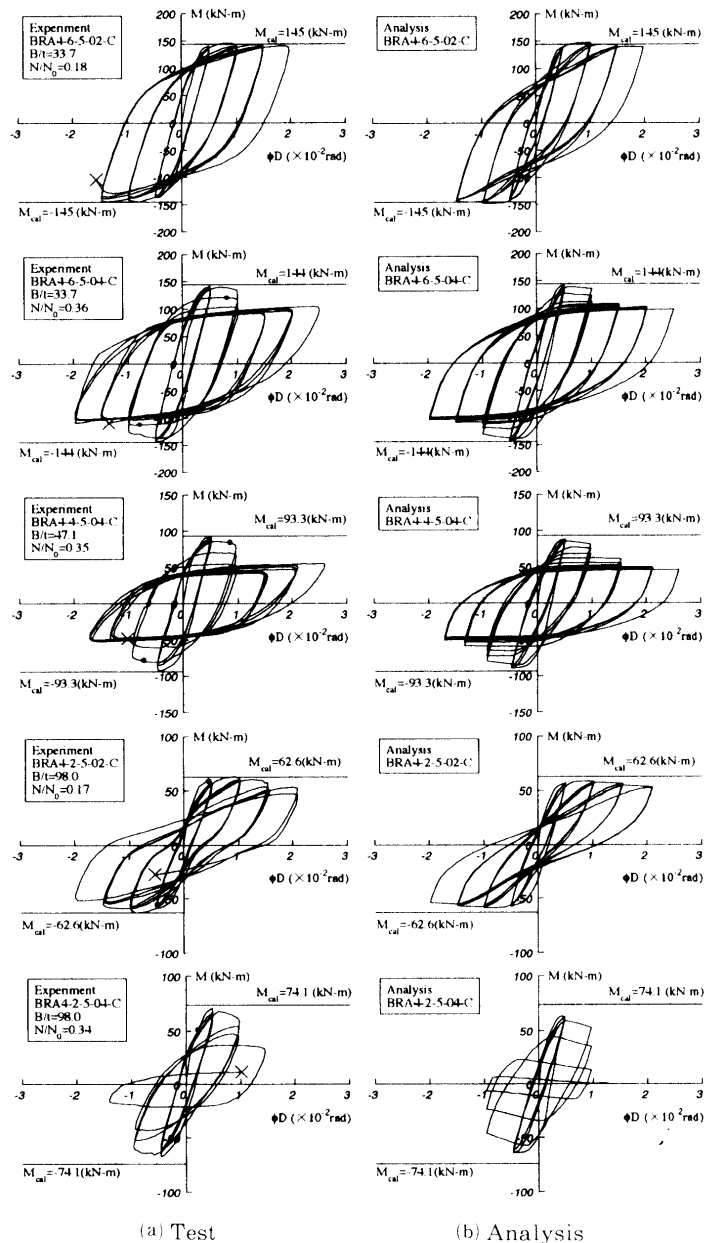


Fig. 7 M-φ D Relations for Cyclic Loaded Specimens

のひずみ勾配の影響を考慮して最大耐力後の劣化を緩やかなものとした。また、Fig. 6の除荷および再負荷曲線については文献²⁾のモデルを引用している。文献²⁾においては、Iyengarらの研究³⁾を基に、残留塑性ひずみ $c\varepsilon_{pl}$ を式(1)で表せるものとしているが、ここではより簡単な文献⁴⁾に示される式(2)を用いて算定した。また、文献²⁾では再負荷時を通るコモンポイント($c\varepsilon_{un}$, $c\sigma_{nc}$)を滝口らの研究⁵⁾を参考にして式(3)により算定されるとしているが、本論の解析においてはこの値を式(4)によって算定した。文献²⁾のモデルは、RC柱のコンクリート部分に対して提案されたものであるが、CFT柱内のコンクリートでは、鋼管が軸方向にも応力を

を負担しており、両者の拘束のメカニズムは若干の相違点がある。即ち、鋼材がコンクリートよりもポアソン比が大きい為、鋼管内部に充填されているコンクリートは、コンクリートのダイラタンシーが起こる以前はRC柱と比較してコンクリートが有効に拘束されていない。本論では、この相違点を、式(3)ではなく式(4)を用いることで表現した。

$$\frac{c\varepsilon_{pl}}{c\varepsilon_{co}} = 0.04 \left(\frac{c\varepsilon_{un}}{c\varepsilon_{co}} \right)^2 + 0.68 \left(\frac{c\varepsilon_{un}}{c\varepsilon_{co}} \right) \quad (1)$$

$$c\varepsilon_{pl} = 0.72 c\varepsilon_{un} \quad (2)$$

$$c\sigma_{nc} = 0.9 c\sigma_{un} + 0.1 c\sigma_{ro} \quad (3)$$

$$c\sigma_{nc} = 0.7 c\sigma_{un} + 0.3 c\sigma_{ro} \quad (4)$$

上記の式中の記号は、Fig. 5を参照されたい。

Fig. 6は、鋼管の応力-ひずみ関係のモデルで圧縮側のスケルトン部はコンクリートと同様に文献¹⁾に示されているものの負勾配部分の傾きを2/3倍して用いたものである。除荷および再負荷は、文献⁶⁾に示されるモデルを用いた。このモデルの特徴は経験した塑性ひずみ s_p の Ψ 倍だけ、反対側のスケルトンを移動させるところにあるが、ここでは、大振幅一回繰り返し実験に対しては、 Ψ の値を0.8とし、漸増振幅繰り返し実験に対する解析においては0.6としている。また、Fig. 6の履歴モデルにおける除荷および再負荷曲線はRamberg-Osgood関数で表現されているが、この曲線の丸みを決定する指数 γ は、一律に4.5としている。これら Ψ , γ の値は実験結果との対応をとる為に設定したものである。なお、引張側のスケルトンは図に示すように降伏強度を $1.1 s_y$ とする完全弾塑性型のモデルとした。この理由は、引張側の鋼管が充填コンクリートの存在により、2軸引張状態となることを考慮した為である。この現象を解析に用いる単軸の応力-ひずみ関係モデルに表現すると、モデルの降伏応力を引張試験から得た降伏応力より大きくすれば良い。著者らは、文献⁷⁾においてこの上昇量に関する考察を行っているが、本論の解析では、文献⁷⁾で得られた知見を引用した。

5. 等曲げ実験と解析の比較

漸増振幅繰り返し載荷実験と解析より得られたM- ϕ D関係と重心軸ひずみ-無次元化曲率関係($\varepsilon_g - \phi$ D関係)をFig. 7とFig. 8に示す。図の(a)が実験値を示し、(b)が解析値を示している。Fig.

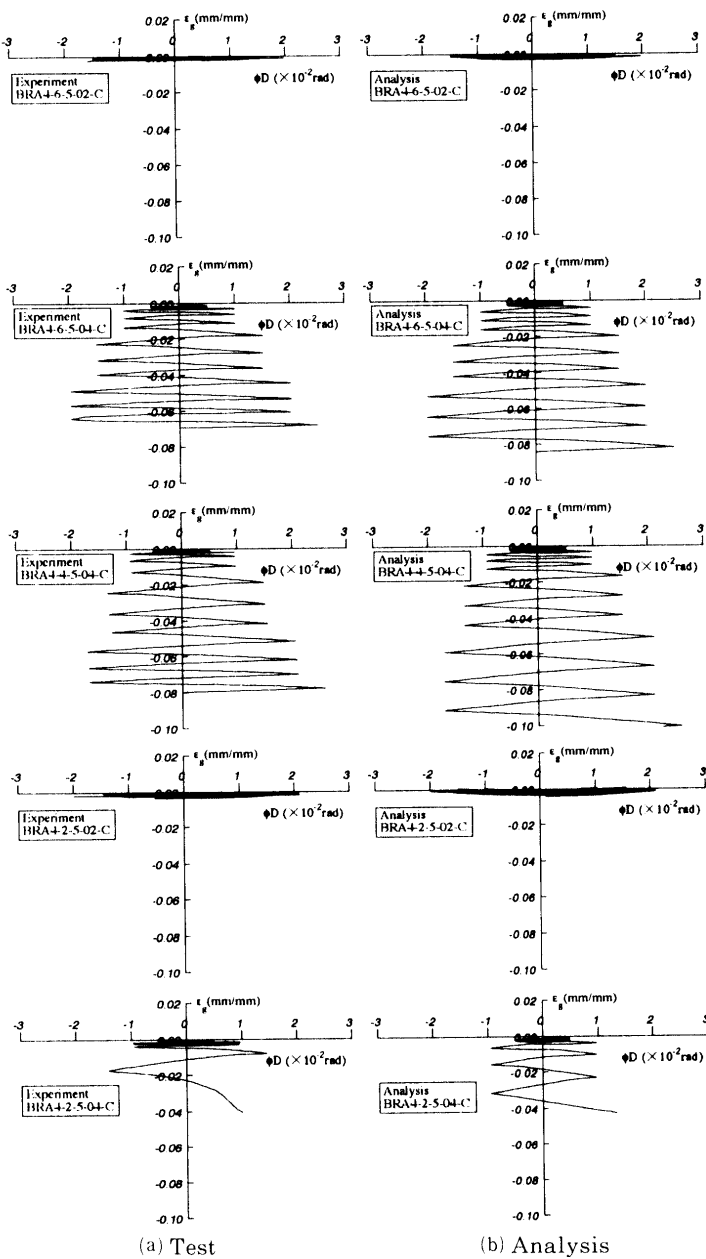


Fig. 8 $\varepsilon_g - \phi$ D Relations for Cyclic Loaded Specimens

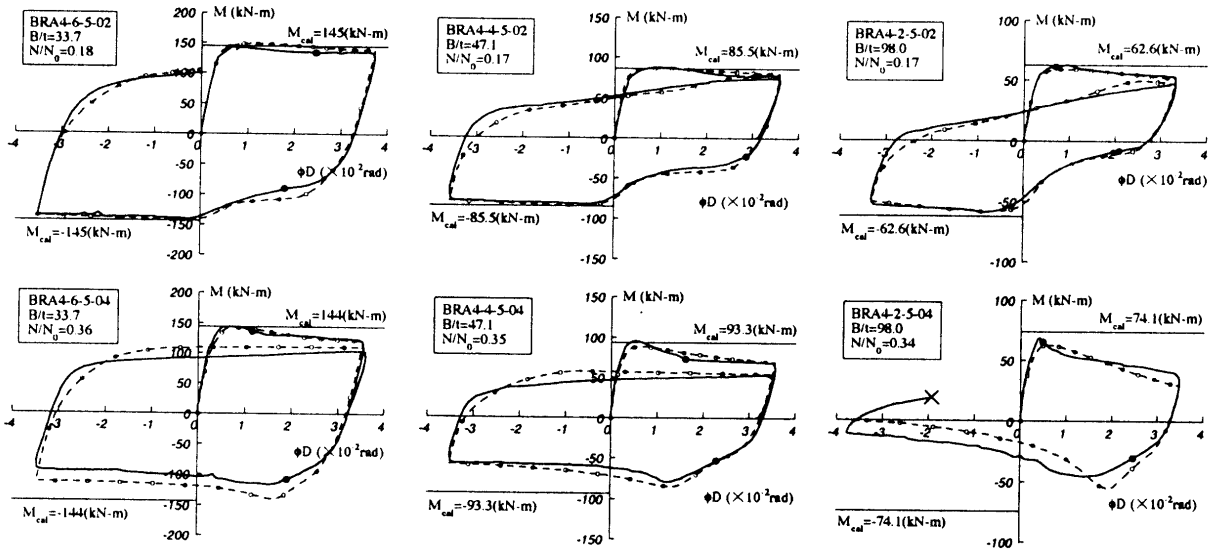


Fig. 9 M-φ D Relations for Monotonic Loaded Specimens

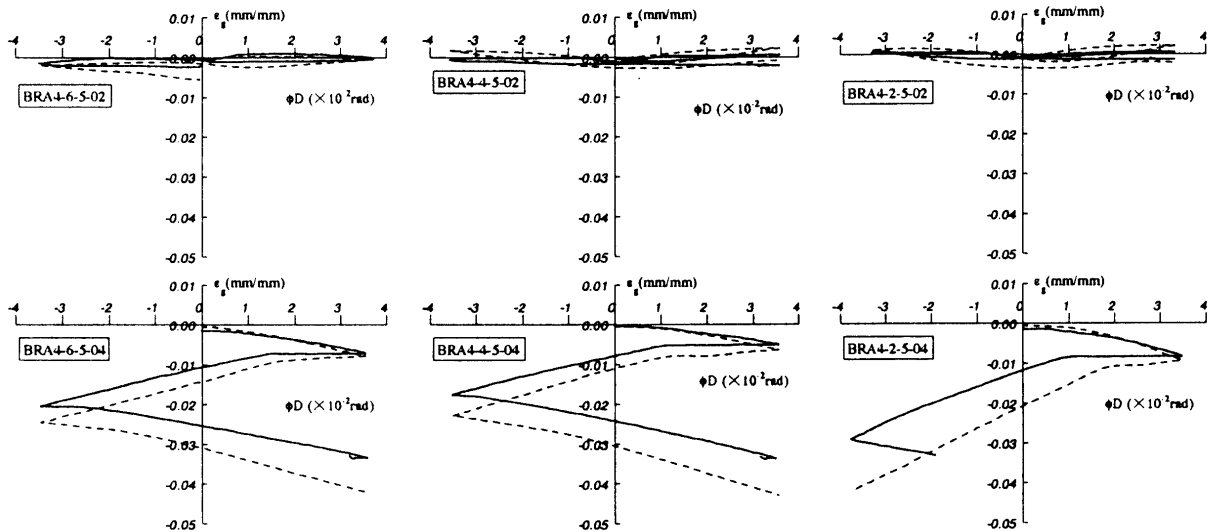


Fig. 10 $\epsilon_g - \phi D$ Relations for Monotonic Loaded Specimens

9, Fig. 10は大振幅一回繰り返し載荷実験と解析より得られたM-φD関係と $\epsilon_g - \phi D$ 関係を示している。図の太実線が実験値で、破線が解析値を示している。なお、Fig. 9のM-φD関係の解析値には○を付けている。Fig. 7とFig. 9の縦軸Mは、材中央の曲げモーメントで軸力による付加曲げを含んでいる。これらの図には、全塑性耐力の算定値 M_{cal} も示してある。Fig. 8とFig. 10の縦軸 ϵ_g は、上下の蒲鉾形球座の回転中心間を結ぶワイヤーの変形量を試験体の長さ600mmで除した値である。図中の●は、実験において、圧縮側のフランジに局部座屈を観測した点を示している。また×は、鋼管の亀裂が観測されたり、試験体が軸力を支持できなくなって、実験を終了した点を示している。軸力比が0.4の漸増振幅

繰り返し載荷実験の場合、幅厚比が98.0の試験体を除き、軸方向変形は漸増するが、曲げモーメントはある一定値に安定することが観測された。これは、CFT部材特有の現象であるが、解析でも同じ挙動を示していることが分かる。また、軸力比が0.4の大振幅一回繰り返し載荷実験の場合、局部座屈の発生後、軸方向変形が急増する現象が見られるが、解析でも同様な挙動が得られている。このように、解析は加力振幅、軸力比、鋼管の幅厚比を問わず、実験の変形挙動を精度良く評価できていることが分かる。特に、軸力比の違いで、重心軸ひずみが累積する場合とそうでない場合とを明確に説明できていることは、解析に用いた応力-ひずみ関係モデルが実際の現象をふまえたものであることを示していると考えられる。

7. まとめ

角形CFT柱の曲げ履歴性状を調べるために、11体の試験体を作成し、載荷プログラム、軸力比、鋼管の幅厚比をパラメータとした一定軸力下における繰り返し等曲げ実験を行った。また、この実験結果と、既に提案している充填コンクリートおよび鋼管の単軸応力-ひずみ関係モデルを用いた解析を比較して角形CFT柱の曲げ挙動の比較を行った。解析は加力振幅、軸力比、鋼管の幅厚比を問わず、実験の荷重-変形関係を精度良く評価できることを示し、提案している応力-ひずみ関係モデルの有用性を示した。

<謝辞> 本研究は、著者の学位請求論文の未発表部分を纏めたものであり、一連の研究に対し御指導を頂いた九州大学大学院教授・崎野健治先生に深く感謝の意を表します。また、実験にあたっては、九州大学文部技官の川口晃氏、津賀山健次氏、浜辰夫氏、久島昭久氏、松岡直人氏の諸氏と九州大学大学院生の糸山勝二、石川忠の両君の多大な御協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 中原浩之, 崎野健治, 稲井栄一: コンクリート充填鋼管柱の中心圧縮性状のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, 第20巻, 第3号, pp. 817-823, 1998. 7
- 2) 孫玉平: 直線型横補強材により拘束された鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状, 九州大学学位論文, 1991. 12
- 3) Desayi, P., Sundara R., Iyengar, K.T. and Sanjeeva R.T.: Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Spirals under Repeated Loading, Material and Construction, Vol. 12, No. 71, pp. 375-383, 1979
- 4) 大庭央久, 田福勝, 池之野陽一, 孫玉平, 崎野健治: 拘束RC柱の安定限界軸力に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 59-60, 1997. 9
- 5) 滝口克己, 黒生清治, 小林克己: 鉄筋コンクリート断面の二軸曲げ解析, 日本建築学会論文報告集, No. 250, pp. 1-8, 1976. 12
- 6) 孟令樺, 大井謙一, 高梨晃一: 鉄骨骨組地震応答解析のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 437, pp. 115-124, 1992. 7
- 7) 蜷川利彦, 中原浩之, 崎野健治: コンクリート充填角形鋼管柱の終局曲げ耐力算定法に関する考察(曲げ引張側の拘束効果を考慮した場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 911-912, 1997. 9