

鋼管コンクリート柱の曲げせん断挙動に関する F E M 解析

米澤 健次 長沼 一洋
江戸 宏彰Nonlinear Finite Element Analysis for Flexure -Shear Behavior of
Concrete Filled Steel Tubular ColumnKenji Yonezawa Kazuhiro Naganuma
Hiroaki Eto

Abstract

This paper proposes a numerical method by FEM that can accurately simulate the hysteretic characteristic of concrete filled steel tubular columns (CFT) under seismic loading. In this investigation, a square steel tube is represented by plane stress elements and the concrete in fill is represented by devised elements that can consider the confined effects of the steel tube in thickness direction. A constitutive law is devised for the steel material that considers the descending curve due to local buckling. FEM analyses are performed under cyclic loading for three existing test specimens with various concrete strengths and steel tube thickness to investigate the analytical method and discuss its applicability in compared with test results.

概 要

地震力を受けるコンクリート充填鋼管柱（以下、CFT柱）の履歴特性を、有限要素法（FEM）で精度良く再現できる解析モデルを開発した。角形断面のCFT柱部材を2次元の平面モデルに置換し、コンクリートには鋼管による厚さ方向の拘束効果を考慮できる特殊な要素を適用し、鋼管部分には局部座屈による応力低下が考慮できる材料構成モデルを用いた。鋼管の厚さとコンクリート強度をパラメータとした3体の試験体を対象として、正負繰返し載荷解析を行い、実験結果と比較して、本解析モデルの有効性を示した。

1. はじめに

鋼管コンクリート柱(CFT)は、鋼管の中にコンクリートを充填することによって、力学的に優れた性能を発揮することから、多くの高層建築物等に適用されている。しかし、CFT柱の力学的挙動には、拘束効果を伴う破壊メカニズム、限界変形等に不明な点があり、特に高強度材料を用いた場合については未解決な点が多いのが現状である。

有限要素法(FEM)解析を用いてCFT柱の力学的挙動を精度良くシミュレーションできれば、実験では測定が難しいデータを得ることができるため、CFT構造の合理的な設計手法の確立に貢献でき、新しい技術開発にも役立つものと考えられる。

また、2000年度より施行される性能評価型設計法では、繰返し荷重を受ける部材の変形性能に対する精度の良い評価手法が求められている。

既往の研究では、CFT柱を対象としたFEM解析の例は

数少なく、特に正負繰返し載荷解析は、ほとんど例をみないのが現状である。

そこで、本研究では地震力を受けるCFT柱の履歴特性を精度良く再現できるFEM解析モデルの確立を目的に、第一段階として、既往の実験試験体を二次元でモデル化して、鋼管による厚さ方向の拘束効果や、鋼管の座屈による影響を考慮した正負交番載荷解析を行い、解析モデルの妥当性を検討した。

2. 解析対象試験体

Table 1に試験体一覧を、Table 2にその材料諸定数を示す。ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究で行われた角形鋼管柱3体の試験体¹⁾を解析対象とした。Fig.1に試験体形状を示す。これらの試験体では、コンクリート強度と幅厚比が実験変数となっている。

実験の加力は、柱頭に $0.4N_0$ の一定軸力を載荷しながら、上下の加力スタブが平行に水平移動するように正負

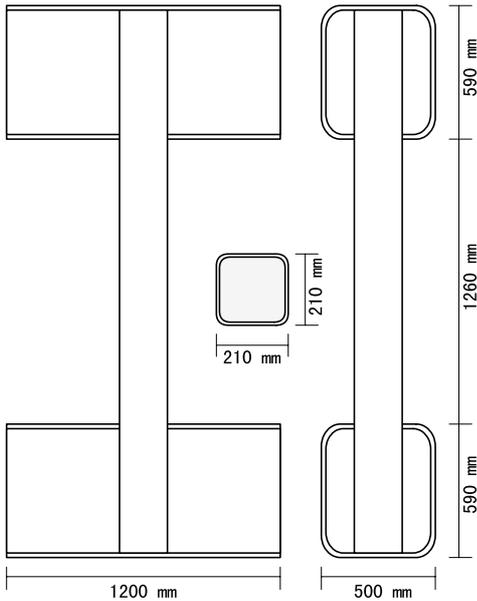


Fig.1 試験体形状 (単位;mm)
Configuration of Specimens

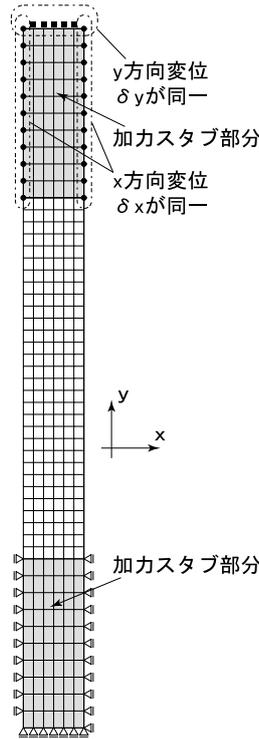


Fig.2 要素分割
Finite Element Meshes

交番のせん断力を与えている。載荷プログラムは、部材角 $\pm 1/400$, $\pm 1/200$, $\pm 1/150$, $\pm 1/100$ (2回), $\pm 1/50$ (2回), $\pm 1/33$, $\pm 1/25$, 最終片押である。

3. 解析概要

解析プログラムは大林組開発ソフト"FINAL"^{2),3)}を用いた。

3.1 解析モデル

Fig.2に要素分割を示す。図に示すように上下加カスタブが平行に移動するように、節点を従属させて境界条件を設定した。コンクリートと鋼管の節点は別々に定義し、その間に接合要素を用いて滑りを考慮した。この接合要素の特性は、接触面に対して垂直方向には十分に大きな剛性を、せん断方向に対しては、十分に小さな剛性を仮定した。

Table 3に解析パラメータを示す。本解析では、鋼管による厚さ方向の拘束効果、鋼管の座屈による応力低下の考慮の有無、及び硬化則の違いをパラメータとして、SR6A4C試験体について4ケースを設定し、解析モデルによる違いが解に与える影響を検討した。なお、本研究ではCASE1で仮定したモデルを基本とする。

3.2 コンクリートモデル

4節点平面要素を用い、等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現した。CFT柱の解析では、鋼板によるコンクリートの拘束効果を表現できる解析モデルが必要となり、ここでは、RC部材の面外補強筋による拘束効果を考慮できる特殊な平面要素⁴⁾をCFT柱に適用する

Table 1 試験体一覧

Properties of Specimens

	SR6A4C	SR6C4C	SR6A9C
柱幅×柱せい	210 mm×210 mm		
鋼管厚	9 mm	6 mm	9 mm
幅厚比	23.3	35.0	23.3
コンクリート設計強度	40 N/mm ²		90 N/mm ²
鋼管強度	590 N/mm ²		
軸力比	0.4No		

$$N_0 = \sigma_y \times s_y A + \sigma_c \times c A$$

$s_y A$: 鋼管断面積, $c A$: コンクリート断面積
 σ_y : 鋼管降伏強度, σ_c : コンクリート強度

Table 2 材料定数一覧

Properties of Materials

	コンクリート		鋼管	
	圧縮強度	ヤング係数	降伏強度	ヤング係数
SR6A4C	38.0	31900	536	209900
SR6C4C	38.4	32500	540	209900
SR6A9C	86.0	36000	536	209900

Table 3 解析パラメータ

Parameters of Analysis

		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
コンクリートモデル	拘束効果	考慮	なし	考慮	考慮
	座屈	考慮	考慮	なし	なし
鋼管モデル	構成モデル	直交異方性	直交異方性	直交異方性	弾塑性モデル

ことより、鋼管による拘束効果を考慮した。この要素は、コンクリートのポアソン効果による厚さ方向の膨張を鋼材が拘束するメカニズムを直交異方性に基づいて定式化されたものであり、鋼材量に応じた拘束効果を考慮することができる。本解析では、鋼材量は面外補強筋比として与え、断面全体に均一に拘束応力が分布するものと仮定した。この要素の有用性を示すために、本解析ケースのCASE1,2において拘束効果の有無をパラメータとした解析を行なった。CASE1では、拘束効果を考慮できる平面要素を用い、CASE2では、要素厚さ方向の応力は"0"と仮定される平面応力要素を用いた。

応力 - ひずみ関係

Fig.3に本解析で仮定したコンクリートの応力 - 等価一軸ひずみ関係を示す。圧縮側の上昇域及び最大強度後の下り勾配のモデル化には修正Ahmadモデル²⁾を用い、除荷、再載荷の履歴ループは文献⁵⁾に示すモデルを用いた。修正Ahmadモデルは、三軸応力下における強度及び靱性の向上が表現できる。コンクリートの三軸応力下の破壊条件は5パラメータモデル(5つの係数は大沼等⁶⁾の実験結果に基づく)により求める。

3.3 鋼管モデル

鋼管のモデル化には、ウェブ鋼板は4節点の平面応力要素、面外方向のフランジ鋼板は軸方向にのみ剛性を有するトラス要素を用いた。

鋼管の材料構成モデルとしては、部材の急激な耐力低下を評価するために、鋼管の座屈を表現する比較的簡易なモデルを考案した。

Fig.4に本解析で用いた鋼管モデルの応力 - ひずみ関係

を示す。このモデルは、鉄筋のモデル化としてCiampi等により提案された修正Menegotto-Pintoの履歴則⁷⁾を基本とし、座屈を考慮する簡易的な方法として圧縮側の応力-ひずみ関係に下り勾配を設けた。下り勾配からの除荷特性としては、引張側の降伏点あるいは降伏後の除荷点を目指すループを仮定している。このモデルのような曲線でモデル化した応力-ひずみ関係は、一軸応力場への適用は容易であるが、通常、鋼板のモデル化として用いられる二軸応力下の弾塑性モデルに直接適用することは難しい。そこで、鋼管のモデル化に用いた平面要素には、直交異方性を仮定し、主応力方向を主軸にとり、応力-ひずみ関係として、Fig.4(座屈考慮モデル)に示す履歴則を適用した。

本解析ケースとして、鋼管の材料モデルがどの程度解析結果に影響するかを示すために、CASE1は座屈考慮の場合、CASE3は座屈無考慮の場合、CASE4は等方硬化則を

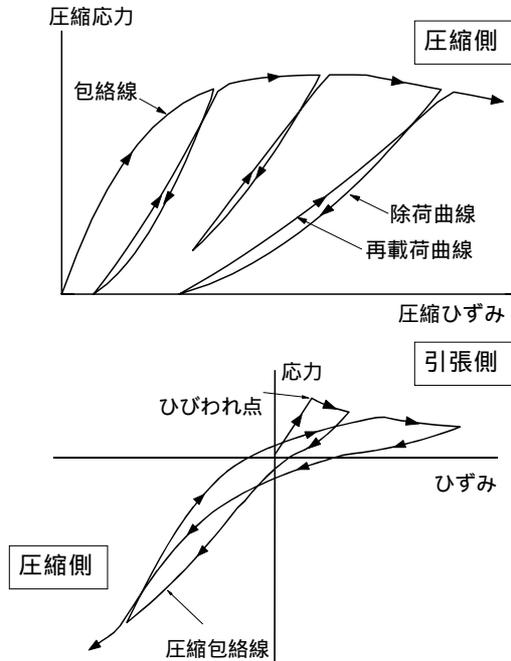


Fig.3 コンクリート応力 - 等価一軸ひずみ関係
Stress-Strain Relationships of Concrete

用いた弾塑性モデルの場合について解析を行なった。CASE3は、鋼板の応力-ひずみ関係として、圧縮側の下り勾配を考慮せず、修正Menegotto-Pintoの履歴則をそのまま適用した場合である。降伏後の第2剛性は初期剛性の1/100とした。

座屈による下り勾配の設定

圧縮側下り勾配の形状を決める各所定数 (ϵ_{SB} , ϵ_{ST} ; Fig.4参照) は、文献8) に従い設定した。

ϵ_{SB} は、鋼管の最大強度時のひずみを示す。つまり座屈開始時のひずみを意味し、(1)式で求めた。(1)式は中空鋼管の中心圧縮実験結果の回帰分析より得られた式⁸⁾である。中空鋼管とコンクリート充填鋼管では、座屈性状が異なるが、文献9)において、鋼材の最大強度時ひずみを中空鋼管の式を用いて算定し、コンクリート充填鋼管の中心圧縮実験を良好に再現できることが報告されている。

$$\frac{\epsilon_{SB}}{\epsilon_y} = 6.06 \frac{1}{\alpha^2} - 0.801 \frac{1}{\alpha} + 1.10 \quad \text{----- (1)}$$

$$\alpha = \left(\frac{D}{t} \sqrt{\epsilon_y} \right)^2 ; \text{無次元化幅厚比の2乗}$$

D: 柱せい, t: 鋼管厚, ϵ_y : 降伏時ひずみ

鋼管は最大強度後は座屈により負担力は減少する。しかし、CFT柱は、変形が進行しコンクリートと鋼管の相互効果により耐力はある一定値に安定する。この一定値になるときのひずみ ϵ_{ST} と応力 σ_{ST} は(2), (3)式より求めた。(2), (3)式はコンクリート充填鋼管の中心圧縮実験結果を回帰分析して得られた式⁸⁾である。

$$\frac{(\epsilon_{ST} - \epsilon_{SB})}{\epsilon_y} = 2.0 + 6.37 \frac{1}{\alpha} \quad \text{----- (2)}$$

$$\sigma_{ST} = (1.14 - 0.209 \frac{D}{t} \sqrt{\epsilon_y}) \sigma_{Smax} \quad \text{----- (3)}$$

σ_{Smax} : 最大強度

各試験体について(1)~(3)式より計算した各諸定数をTable 4に示す。

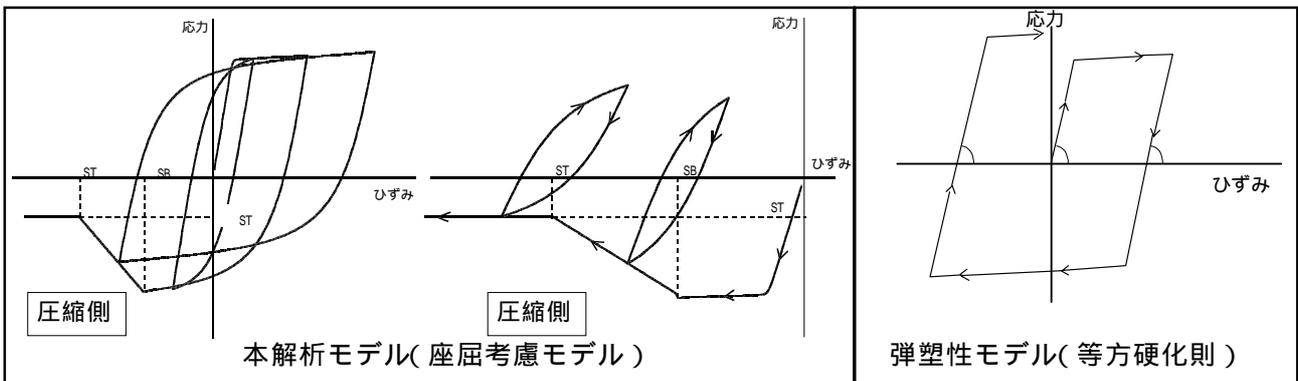


Fig.4 鋼管の主応力 - 主ひずみ関係
Stress-Strain Relationships of Steel Tubular Column

Table 4 圧縮側下り勾配諸係数 (単位: %, N/mm²)
Factors of Descending Branch in Compression

	y	SB	ST	ST
SR6A4C	0.268	0.852	2.572	496
SR6C4C	0.268	0.389	1.495	415
SR6A9C	0.257	0.810	2.453	496

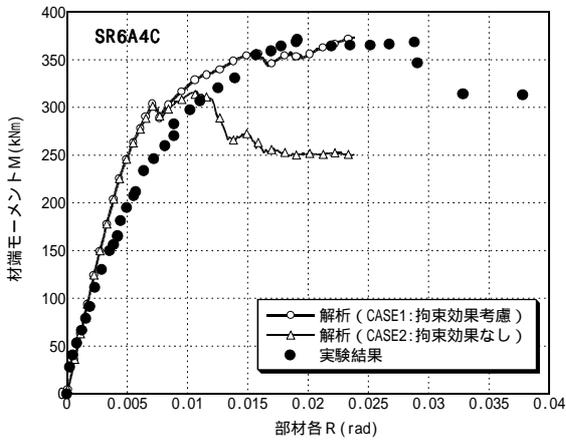


Fig. 5 材端モーメント(M) - 部材角(R)関係
(拘束効果考慮の有無の比較: SR6A4C 試験体)

Bending Moment(M)-Deformation Angle(R) Relationships

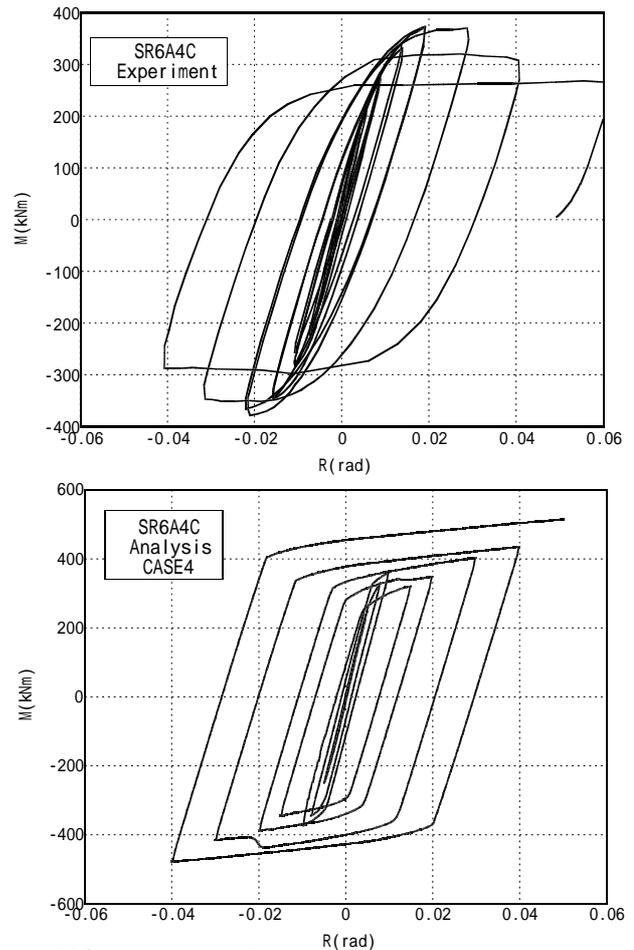
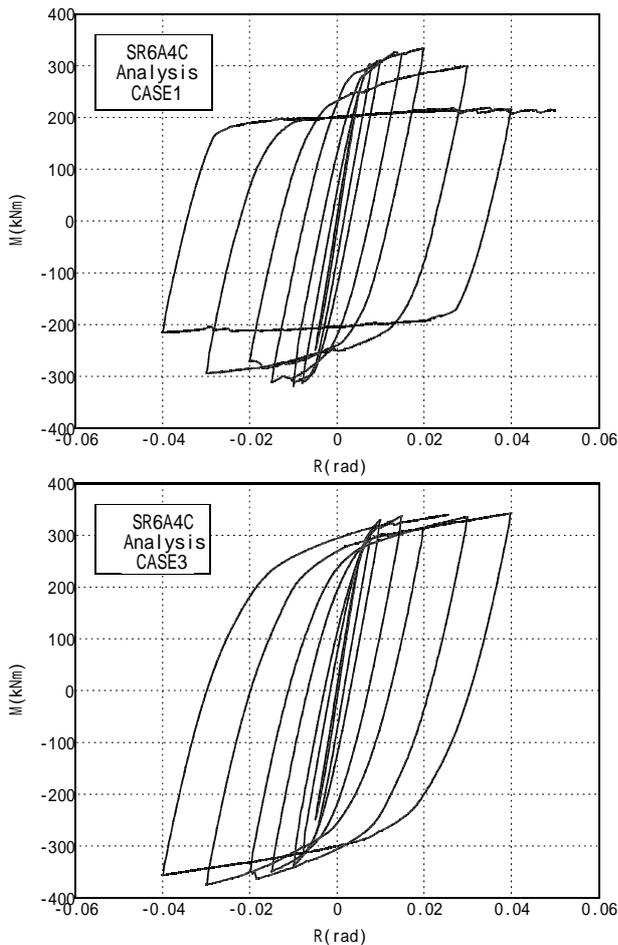


Fig. 6 材端モーメント(M) - 部材角(R)関係の比較

(鋼管モデルの違いによる比較: SR6A4C 試験体)

Comparison of Bending Moment(M)-Deformation Angle(R) Relationships

4. 解析結果

4.1 解析パラメータの比較

コンクリートのモデル化として、本論の3.2節に記述した拘束効果を考慮できる平面要素を用いた場合(CASE1)と拘束効果を考慮しない場合(CASE2)の比較をFig.5に示す。Fig.5は材端モーメント(M) - 部材角(R)関係の包絡線を示しており、CASE1,2の解析モデルにおける単調載荷解析の結果を示している。なお、本報で示す全てのM-R関係において、実験の材端モーメントは、軸力による付加曲げモーメントを含んだ値であるが、解析では幾何学的非線形を考慮していないため付加曲げモーメントは考慮されていない。

拘束効果を考慮していないCASE2の解析は、CASE1に比べ早期に耐力低下が生じており、実験結果と比較しても耐力及び靱性能を過小評価する結果となった。

一方、CASE1の解析では、加力スタブの変形が考慮されていないため、実験結果に比べ、剛性を若干大きめに評価しているが、ほぼ良好な対応を示した。

Fig.6に鋼管の構成則を解析変数としたCASE1(基本モデル)、CASE3(座屈なし)、CASE4(弾塑性モデル)の

解析結果と実験結果の比較を示す。

CASE3の解析結果は、耐力低下が生じるまでのループについては、実験結果とほぼ同様である。しかし、実験では $R=+0.04$ を目指すループから鋼管の座屈により顕著な耐力低下が生じているが、CASE3の解析では、鋼管の座屈が考慮されていないので、顕著な耐力低下は見られず、靱性能を過大評価する傾向を示した。

等方硬化則の弾塑性モデルを用いたCASE4は、繰返し载荷によりひずみ硬化が顕著に現れ、実験に比べ、耐力を過大評価する傾向を示した。

一方、CASE1の解析結果は、 $R=+0.03$ の履歴ループより耐力低下が見られ、相対的に実験結果と良好な対応を示していることがわかる。

4.2 SR6C4C, SR6A9C試験体についての比較

CASE1の仮定を用いたSR6C4C, SR6A9Cについての解析結果と実験結果の比較をFig.7に示す。SR6C4Cの解析結果に関しては、実験結果と同様に2回目の $R=+0.02$ のループより耐力低下が生じており、 $R=+0.03$ 以降のループで急激に耐力低下している。SR6A9C解析結果に関しても、実験結果と同様に $R=+0.03$ のループより耐力が低下し始めている。

SR6C4Cの解析は実験と比べ耐力を小さめに評価し、

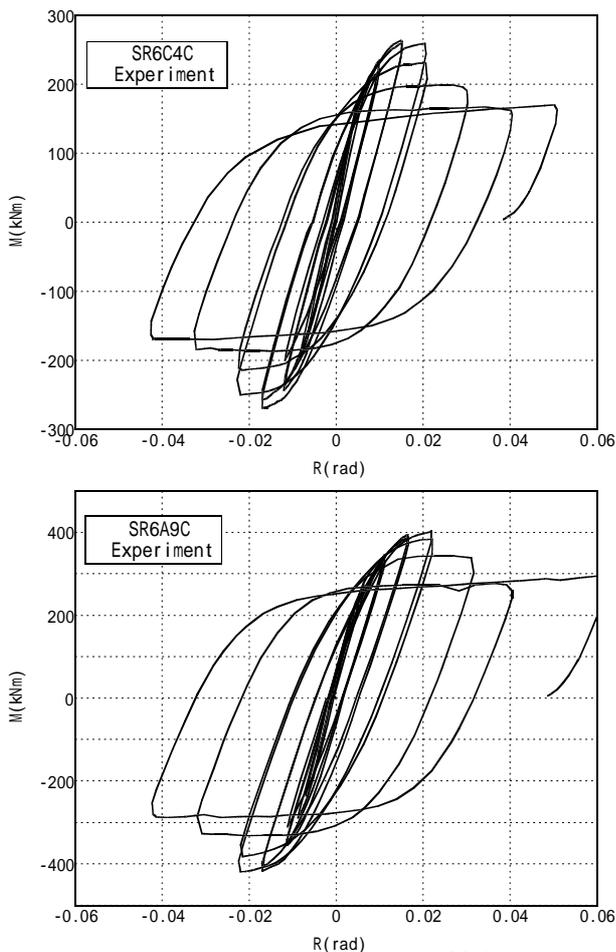


Fig.7 材端モーメント(M) - 部材角(R)関係の比較

(SR6C4C, SR6A9C 試験体、CASE1と同様の解析モデル)

Comparison of Bending Moment(M)-Deformation Angle(R) Relationships

SR6A9Cの解析は実験と比べ耐力低下の割合を小さめに評価する傾向を示したが、耐力低下し始めるポイントや履歴ループの形状について実験結果と良好に対応していることがわかる。解析が実験に比べ耐力及び最大耐力後の耐力低下の割合を小さめに評価する理由として、解析で軸力による付加曲げモーメントが考慮されていないことが挙げられる。

4.3 等価粘性減衰の実験と解析の比較

Fig.8に実験と解析(CASE1)の等価粘性減衰の比較を示す。等価粘性減衰はFig.8に示す計算法より算定した。解析では、負側の等価粘性減衰を実験に比べ過大評価する傾向にあるが、正側においては、良好な対応を示している。負側の等価粘性減衰を過大評価する理由としては、部材角 $(R)=\pm 0.01$ radのサイクルにおいて、解析時間の制約のため、実験では同じ部材角のサイクルを2回繰返しているのに対し、解析では各部材角サイクルを1回のみとしていることが一因にあげられる。しかし、解析と実験は定性的に良好な対応を示すことがわかる。

以上より、CASE1で仮定した解析モデルを用いることより、角形CFT柱の履歴特性を定性的に追跡できることを確認した。

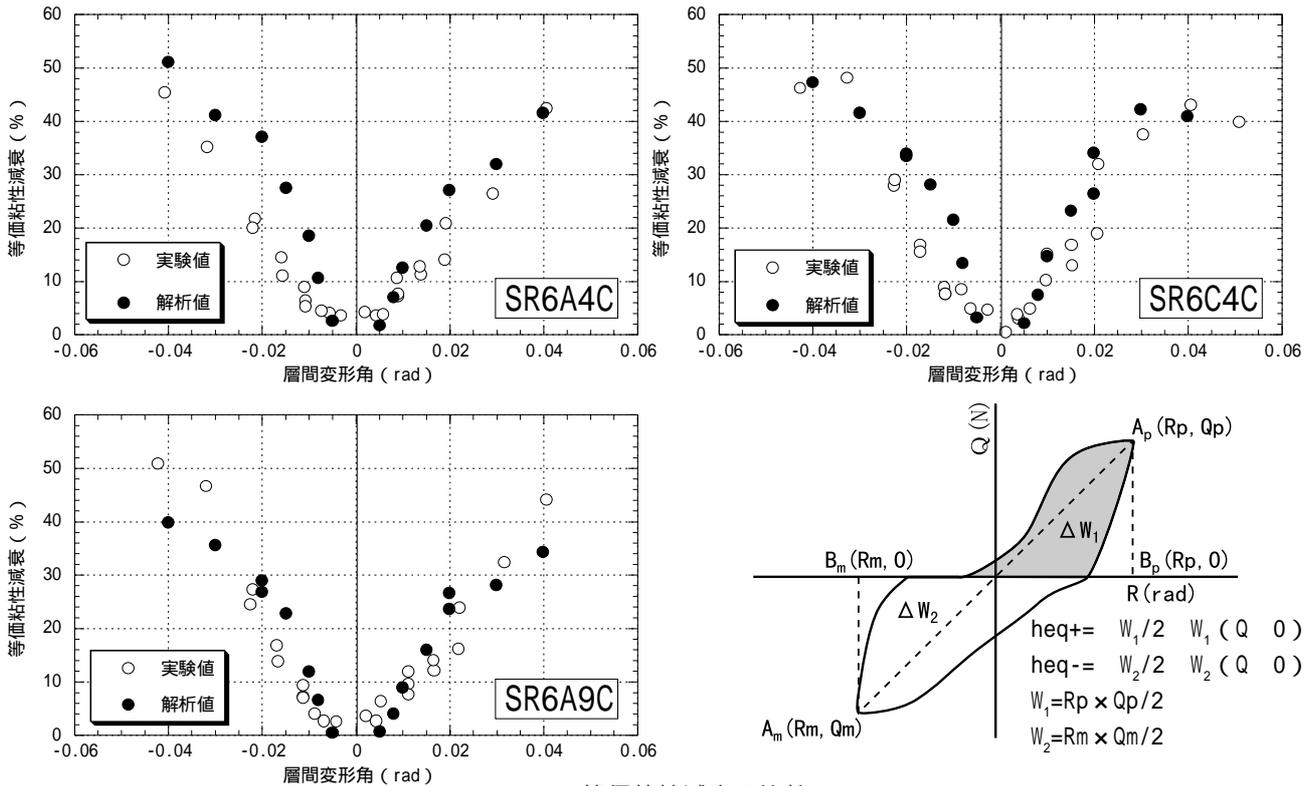


Fig.8 等価粘性減衰の比較
Comparison of Equivalent Viscous Damping

しかし、本研究における解析対象は3体のみであり、今後、性能評価型設計法に着眼した変形性能の評価手法として用いるためには、数多くの実験を対象とした解析を行い、さらに、詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、二次元FEM解析を用いてCFT柱の曲げせん断挙動に対する履歴特性のシミュレーションを行なった。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) CFT柱のコンクリートのモデル化として、RC部材の面外補強筋による拘束効果を表現できる平面要素を準用し、その要素のCFT柱への有用性を示した。
- 2) 鋼管の応力 - ひずみ関係として、修正Menegotto-Pintoの履歴則に下り勾配を設けた修正モデルを用いることにより、鋼管の座屈現象を簡易的に再現することができた。
- 3) 解析結果と実験結果を比較検討した結果、本研究で仮定した解析モデルを用いることで、解析対象としたCFT柱の履歴特性を定性的に再現できることがわかった。

【参考文献】

1) 向井昭義他, 「ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-9~16), コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状(その1~8)」, 建築学会大会梗概集

概集C-1(近畿), pp.1023-1038, 1996.9
 2) 長沼一洋, 「三軸応力下のコンクリートの応力 - ひずみ関係」, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.163-170, 1995.8
 3) 長沼一洋, 「非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方性構成モデル」, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, pp.109-116, 1996.7
 4) 長沼一洋, 「面外方向の補強筋の拘束効果を考慮した平面要素による鉄筋コンクリート部材の解析手法」, 日本建築学会構造系論文集, 第524号, pp.119-124, 1999.10
 5) 大久保雅章他, 「正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁の解析(その1)」, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.133-136, 1995.3
 6) 大沼博志他, 「三軸応力下におけるコンクリートの強度特性」, 電力中央研究所報告, No.381021, 1981.2
 7) Ciampi, V., et al.: Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No.UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982.
 8) 中原浩之他, 「ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-18), コンクリート充填角形鋼管柱の中心圧縮性状」, 建築学会大会梗概集(関東) pp.919-920, 1997.9
 9) 中原浩之他, 「コンクリート充填角形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, No3, pp.817-822, 1998