

CFT 柱の繰り返し履歴特性を考慮した汎用的な 3 次元セグメントモデルの提案

豊田工業高等専門学校 正会員 川西直樹 次世代耐震工学研究所 フェロー会員 後藤芳顕

1. 研究背景と目的： コンクリート充填柱(以降, CFT 柱と記す)は, 既往の研究¹⁾などから, 繰り返し水平荷重下の履歴挙動に関して, ピーク点以降の軟化域でも無充填柱と異なり急激な復元力低下はなく, 安定した履歴吸収エネルギー能を持つことが知られている. これは, CFT 柱の鋼管に圧縮応力による局部座屈変形が生じても充填コンクリートがこの圧縮応力を支えるとともに繰り返しを受ける CFT 柱特有の局部座屈変形の修復機構が働き, 局部座屈変形が進展しないことによる¹⁾. しかし, 現行の CFT 柱の耐震設計法²⁾などでは, 無充填柱と同様に, 静的な漸増両振り繰り返し載荷における最大荷重点を限界点と定められており, 最大荷重点以降の高いエネルギー吸収能が設計に反映されていないのが実状である. CFT 柱に対しこのような安全側な耐震設計法が採られている背景には CFT のポストピーク域での高いエネルギー吸収能の定量的評価手法や, ポストピークでの動的な応答値を正確に算出するための適切なモデルが確立されていないことがあると考えられる. また, 現行の耐震設計法における復元力モデルは水平 1 方向の地震動の応答計算のみに対応するものであり, 水平 2 方向の地震動に対して考慮することができないという課題もある. そこで本研究では, これまでに著者らが明らかにしてきた CFT 柱のポストピークも含めた挙動特性を反映できる汎用かつ実用的な 3 次元セグメントモデルを提案する. このセグメントモデルは複合断面はり要素に基づく CFT 構造モデルにおいて損傷が卓越するセグメントに組み込むことで, 一般の CFT 構造においてもポストピーク挙動を解析できる可能性がある. 本セグメントモデルの妥当性はこれまで著者らが実施した CFT 柱の繰り返し載荷実験結果やこれを基に開発した精緻な 3 次元 FE モデルによる解析結果と比較することで検証した.

2. CFT 柱の 3 次元セグメントモデルの提案

(1) CFT セグメントのモデル化： 部分充填 CFT 柱を対象に CFT セグメントのモデル化について説明する. 図 1 のようにコンクリートを充填した基部の上下ダイヤフラム間をセグメントとして, 鋼管を 1 本の 3 次元はり要素, 充填コンクリートは複数本の 3 次元トラス要素で表す. 鋼管下部の局部座屈変形が生じる部分を有効破壊長領域として鋼管の構成則として圧縮側には局部座屈により応力が低下する軟化モデルを導入する. この領域は軟化にともなう局所化による数値解析上の不安定性が生じる可能性があるため, この区間を 1 要素(節点 1-2)でモデル化する. これ以外の部分の鋼管には通常のバイリニア型移動硬化則(二次勾配は $1/100E$ とする)を用いる. 充填コンクリートはセグメントの上下ダイヤフラム間を部材長とする複数のトラス要素でモデル化する. トラス要素の総断面積は充填コンクリートの断面積に等しく, 本数は曲げ挙動が再現できるように決定する. トラス要素の上下端のピン節点群は剛な上下ダイヤフラム要素に接合される. この上下ダイヤフラム要素は鋼管を表したはり要素にそれぞれ節点 1 と節点 3 で剛結する. トラス要素に用いる充填コンクリートの 1 軸の材料構成則はコンクリート標準示方書³⁾のモデルによるが, 圧縮強度 f_c とこのときのひずみ ε_{peak} は, CFT の拘束効果を反映するため, 3. で述べる一方向漸増両振り繰り返しを受ける CFT 柱の履歴挙動の FE 解析結果と整合するよう同定する. なお, 引張り側の応力については無視する.

(2) 局部座屈を考慮した有効破壊長領域の鋼管の材料構成則： 圧縮側には鋼管に局部座屈による軟化特性を与える必要がある. このため, 降伏条件式は, 引張り側を f_t , 圧縮側を f_c とし, 塑性ひずみ ε_{pl} の関数として以下のように独立して定義する.

$$f_t = f_t(\varepsilon_{pl}) = E_{2t}\varepsilon_{pl} + \sigma_{yt} \quad (1a)$$

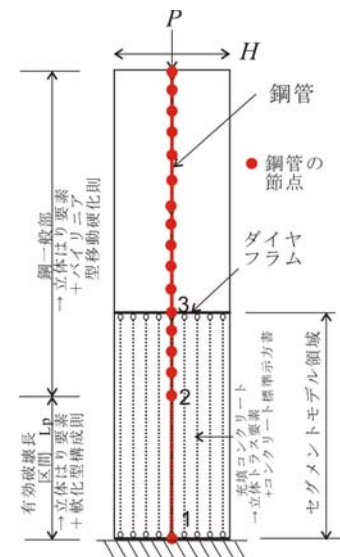


図1 CFT柱の3次元セグメントモデル

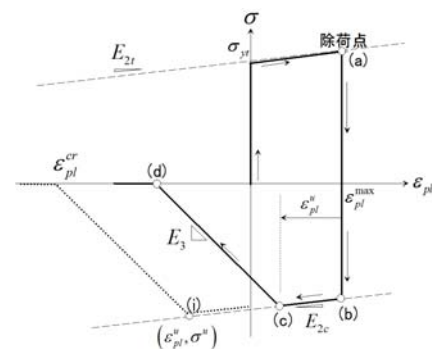


図2 有効破壊長域の材料構成則

キーワード： CFT 柱, 復元力, 耐震設計法, 繰り返し載荷

連絡先： 〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1 TEL:0565-36-5883 FAX:0565-36-5927

$$f_c = f_c(\varepsilon_{pl}) = \begin{cases} E_{2c}\varepsilon_{pl} + \sigma_{yc} & (\varepsilon_{pl}^{\max} + \varepsilon_{pl}^u \leq \varepsilon_{pl} \leq \varepsilon_{pl}^{\max}) \\ E_3(\varepsilon_{pl} - \varepsilon_{pl}^{\max} - \varepsilon_{pl}^u) + \sigma^u + E_{2c}\varepsilon_{pl}^{\max} & (\varepsilon_{pl}^{cr} \leq \varepsilon_{pl} \leq \varepsilon_{pl}^{\max} + \varepsilon_{pl}^u) \\ 0 & (\varepsilon_{pl} \leq \varepsilon_{pl}^{cr}) \end{cases} \quad (1b)$$

ここで、 $\varepsilon_{pl}^{\max}$ は履歴中における引張り側の最大塑性ひずみであり、 $\varepsilon_{pl}^{\max} \geq 0$ である。 σ'' , ε_{pl}^u (いずれも負値) は圧縮側の最大時の応力とこのときの塑性ひずみであり、 ε_{pl}^{cr} (< 0) は圧縮側の骨格曲線において応力が 0 となる時の塑性ひずみである。降伏判定条件式は、(i) $f_c \leq \sigma \leq f_t$ のとき弾性、(ii) $\sigma > f_t$ のとき引張り側で塑性、(iii) $\sigma < f_c$ のとき圧縮側で塑性となる。繰り返し則については、図 2 のように履歴最大塑性ひずみ $\varepsilon_{pl}^{\max}$ により、初期の骨格線における圧縮側の最大点(i)は(b)に移動し、圧縮側の降伏条件は図のように $\varepsilon_{pl}^{\max}$ により変化するものとする。この材料構成則のパラメータは弾性係数 E_{el} 、各状態における塑性剛性 E_{2t}, E_{2c}, E_3 、降伏応力 σ_{yt}, σ_{yc} と ε_{pl}^u の計 7 個であり、これらのパラメータも CFT 柱の履歴挙動の FE 解析結果より同定する。

以上の提案したセグメントモデルのここでの検討フローを図3に示す.

3. セグメントモデルの材料パラメータの同定: 2. で提案したセグメントモデルの同定すべきパラメータは鋼管材料で 7 個, 充填コンクリート材料で 2 個, さらに, 有効破壊領域長 L_p の計 10 個である. ここでは, 解析対象である CFT 柱の一方向繰返し載荷による水平荷重-水平変位の履歴挙動を高度な FE 解析¹⁾により算定し, セグメントモデルによる解析結果ができるだけ整合するように全パラメータを最適化することで同定する.

検討モデルは図 4 の高さ 1.833m、鋼管径 267.4mm の CFT 柱模型¹⁾である。この模型では直径の 2 倍の高さまでコンクリートが部分充填されている。また、軸力比は 0.15、径厚比パラメータ 0.99、細長比パラメータ 0.57 である。パラメータ最適化後のセグメントモデルによる解析結果を最適化の基準である FE 解析結果と比較して図 5 に示す。最適化したセグメントモデルの各パラメータの値を表 1 に記す。図 5 より、セグメントモデルによる解析結果は、CFT 柱の特徴であるピンチング挙動が再現できており、履歴挙動は FE 解析結果に近いことが分かる。ただし、細かく検討すると、セグメントモデルでは、ピンチングにより一時的に荷重低下が生じる領域が短く、早期に荷重の反転が起きている。また、繰り返しによる折り返し点の荷重が FE 解析に較べやや低下している。

4. 二方向繰り返し载荷の結果： 3. で最適化したパラメータを利用したセグメントモデルを用いて CFT 柱が水平二方向の繰り返し载荷（らせん状の繰り返し载荷）されたときの履歴曲線を FE 解析結果と比較して図 6 に示す．これより，一方向繰り返しの場合と同様に，セグメントモデルは二方向繰り返しでも折り返し点の荷重が FE 解析に較べやや小さくなっているが，ほぼ FE 解析によるポストピークの挙動をよく表現している．これより，本セグメントモデルは 2 方向繰り返しを受ける CFT 柱の軟化域も含めた履歴挙動の算定に有用であるといえる．

参考文献： 1) 後藤ら：地震動下のコンクリート充填円形断面鋼製橋脚における局部座屈変形の進展抑制機構と耐震性向上，土木学会論文集 A1, Vol.69, No.1, pp.101-120, 2013. 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012. 3) 土木学会：コンクリート標準示方書・耐震性能照査編，丸善，2002.

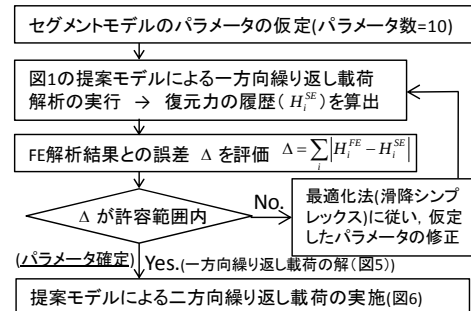


図3 本論文での検討フロー

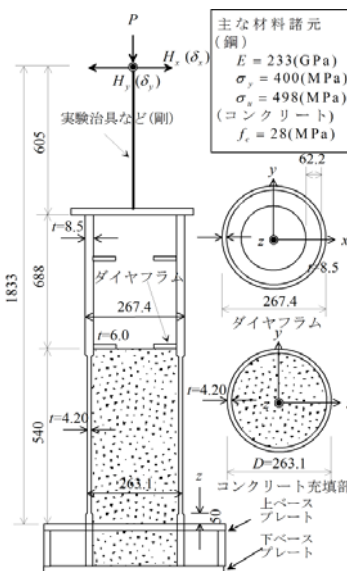


図 4 検討対象

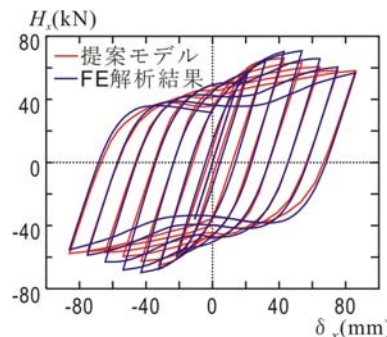


図 5 CFT 柱の一方向繰り返し載荷

表1 最適化した各パラメータの結果

$$E_{el} = 0.648E, E_{2t} = 0.010E_{el}, E_{2c} = 0.023E_{el}, E_3 = -0.037E_{el},$$

$$\sigma_{yt} = 0.791\sigma_y, \quad \sigma_{yc} = -0.888\sigma_y, \quad \varepsilon_{pl}^u = -4.40(\sigma_y / E)$$

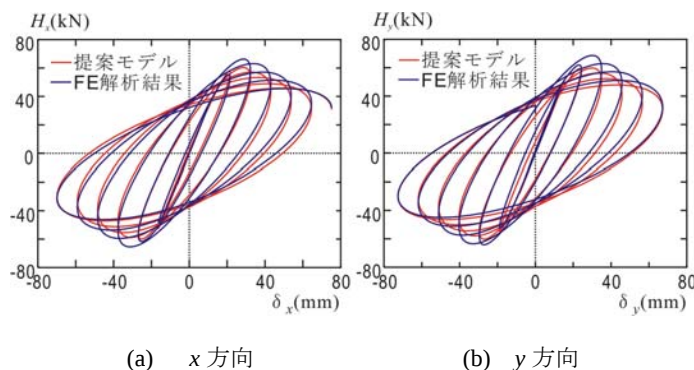
$$f_c = 2.24 f_c^{FE}, \quad \varepsilon_{peak} = 1.32(\%), \quad L_p = 0.66D$$


図 6 CFT 柱のらせん載荷