

コンクリート部分充填円形断面柱の軸力比と耐震性能の関係

豊田工業高等専門学校 正会員 ○川西 直樹

名古屋工業大学 フェロー会員 後藤 芳顕

1. 背景・目的

アーチリブなどにおいて、レベル 2 地震動に対する耐震性能照査時に軸力比 P/P_y が 50% を超える事例も報告¹⁾されている。このような場合、無充填の薄肉鋼管柱では、高軸力下のポストピーク領域において、局部座屈変形が進行しやすくなり、水平復元力も著しく低下することが知られている。一方、コンクリート部分充填鋼製橋脚 (CFT 柱) については、軸力比 P/P_y が 30% まで行った著者らの実験から、軸力が増加しても、鋼管に局部座屈が生じても圧縮力のほとんどはダイアフラムを介して充填コンクリートに伝達されるため、局部座屈の進展が大きくないこと、さらに水平ひび割れ面の接触するコンクリートの圧縮領域が増加し、有効断面積が増加することで CFT 柱の強度・剛性が向上しうることが示されている。このことから、上記のような大地震時に高軸力を受ける構造部材として CFT 構造を部分的に採用することは耐震対策として有用であると考えられる。そこで、本研究では、軸力比 60% までの高軸力が作用する CFT 柱について、これまで著者らが開発した精度の高い数値解析法²⁾などを用いて軸力比と耐震性能との関係を明らかにする。

2. 検討対象と数値解析方法

検討対象は、本研究室で以前に行ったコンクリート充填円形断面橋脚試験体 (図 1) とする。本試験体の鋼材は STKR400 材であり、径厚比パラメータ R_t は 0.088、軸力比 $P/P_y = 0.15$ 時の降伏水平荷重 $H_0 = 41.0$ (kN)、降伏水平変位 $\delta_0 = 10.8$ (mm) である。軸力による影響を考察する

ため、軸力比を 0.10, 0.15, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 とした各ケースについて、一定鉛直荷重下で水平 1 方向漸増繰り返し載荷 ($\pm 1\delta_0, \pm 2\delta_0, \dots, \pm 8\delta_0$) を 8 サイクルまで行う。解析モデルとして著者らが提示した有限要素モデル³⁾を用いる。仮想ひび割れについては、文献 3) と同様に解析においてコンクリートが引張強度に達する位置に順次仮想ひび割れを挿入し履歴曲線が収束するまでこの手続きを繰り返す。界面では接触・離間・滑りの挙動を考慮するため、ABAQUS のコンタクトペアと、接触時の界面摩擦挙動には摩擦係数を 0.2 としたクーロン摩擦モデルを用いる。鋼材の一軸引張試験より求められた真応力 - 対数ひずみ関係と繰り返し塑性モデルである三曲面モデル⁴⁾の材料パラメータ値を図 2 と表 1 に示す。充填コンクリートには損傷塑性モデルを用いる。材料特性についてはシリンダ圧縮試験結果に基づき FE モデルによる逆解析から定めた文献 3) と同様の応力 - ひずみ関係 (図 3) と材料パラメータ値 (表 2) を採用する。鋼材と充填コンクリートの初期間隙については、実験とのキャリブレーションの結果、コンクリートの乾燥収縮ひずみの 10 倍の値を用いる。すなわち、初期間隙は鋼管と充填コンクリート間で 0.30mm、ダイアフラムと充填コンクリート間で 1.0mm とする。

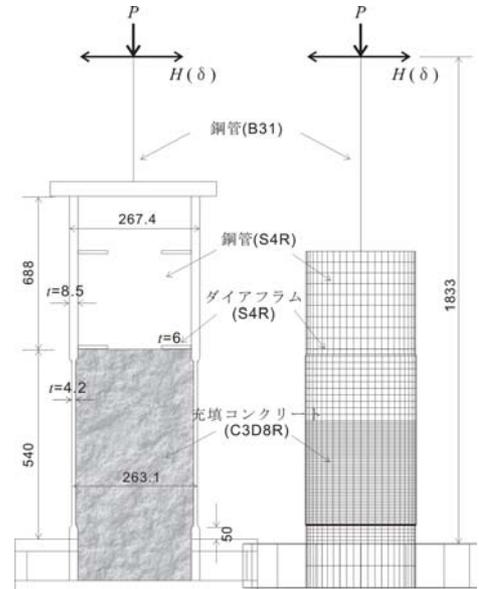


図 1 検討対象と数値解析モデル

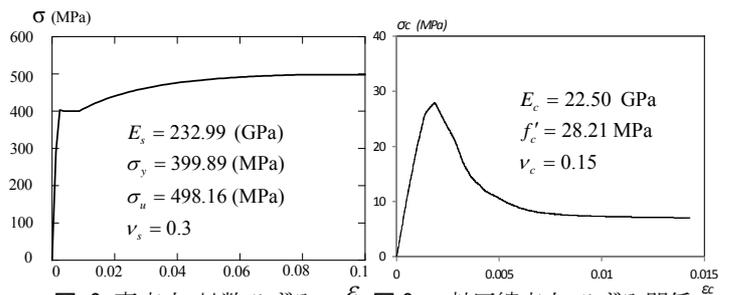


図 2 真応力 - 対数ひずみ関係 図 3 一軸圧縮応力 - ひずみ関係

表 1 三曲面モデルパラメータ

| f_b / σ_y | β | K | ρ |
|------------------|---------|-----|--------|
| 0.38 | 150 | 2 | 2 |

表 2 損傷塑性モデルパラメータ

| ψ | e | σ_{0}/σ_0 | K_c |
|--------|-----|-----------------------|-------|
| 10° | 0.2 | 1.10 | 0.70 |

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

キーワード： CFT 柱, FEM 解析, 高軸力, 耐震性能

3. 数値解析による高軸力を受ける円形断面 CFT 柱の耐震性能

軸力比 $P/P_y=0.15$ と 0.30 のケースの水平復元力-水平変位履歴曲線を図 4 に示し、これらの履歴曲線から求めた各軸力のケースの包絡線を図 5 に示す。この図より、軸力比が 0.10 と 0.15 とのケースでは最大水平荷重はほぼ同じであるが、軸力比が 0.15 以上になると、最大水平荷重は減少することが分かる。また、軸力比の増加にともない最大水平荷重時の水平変位は小さくなり、軸力比 0.30 以下では、 $\delta \geq 4\delta_0$ で水平力が最大となるが、軸力比 0.40 以上では $\delta = 3\delta_0$ で最大となる。図 6 は無充填鋼管中について CFT 柱と同様な水平繰り返し载荷を行った履歴曲線から求めた包絡線である。図 5 と図 6 との比較から、無充填鋼管柱に比べ CFT 柱の耐震性能が圧倒的に優れていることが分かり、とくに軸力比 0.30 以上の高軸力の場合であっても CFT 柱はポストピーク領域での復元力の低下が少なく、変形能が高いことが大きな特徴であり、大地震時に高軸力を受ける構造部材として適した力学性能を有していることが分かる。

CFT 柱の軸力比と最大水平荷重の関係についてさらに考察するため、今回の検討対象の CFT 柱について文献 5)による軸力作用時の終局水平耐力の予測式による算定結果と今回の数値解析の結果とをあわせて図 7 に示す。文献 5)では鋼管と充填コンクリートの終局耐力を分けて算出し、それぞれの累加により CFT 柱全体の終局耐力を算定する方法であり、CFT 柱の細長比 l_k/D (l_k : 座屈長さ, D : 鋼管外径) に応じて短柱 ($l_k/D \leq 4$) のときと付加曲げを考慮した長柱 ($l_k/D > 12$) の式が分かれて提示されており、ここではその両者を記している。なお、今回の検討対象は、 $l_k/D=13.9$ であり、文献 5)の長柱に属する。図 7 より、今回の解析結果はいずれのケースにおいても文献 5)の長柱の予測式による終局水平耐力を上回っており、予測式は安全側の評価となっていることが分かる。また、軸力比が 0.30 以上の高軸力域では、解析結果と長柱の予測式とで軸力比の変化に対する終局水平耐力の変化の割合がほぼ同じであることが分かる。つぎに、軸力比が 0.20 以下の領域では、文献 5)の長柱の予測式で軸力の増加にともない終局水平耐力 H_u が増加しており、これは軸力増にともない、軸力を主に負担する充填コンクリートの圧縮領域(有効断面)が増加するためである。一方、今回の数値解析の結果は、軸力増加にともない終局水平耐力が低下している点が予測式の結果と明らかに傾向が異なっている。このような差異が生じる一因としては、2. の解析条件で記した鋼管と充填コンクリートとの初期間隙を通常のコンクリートの乾燥収縮ひずみの 10 倍とした大きな初期間隙を与えたため、充填コンクリートに作用する軸力の分担割合が実際の CFT 柱に比べ小さくなり、コンクリートの有効面積の増加が少なくなったためと推察される。今後は鋼管と充填コンクリートとの初期間隙の大きさが解析結果に与える影響についてさらに検討していく予定である。

参考文献: 1) 野中ら: 上路式鋼アーチ橋の大地震弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究, 土木学会論文集, No731/I-63, pp.31-49, 2003. 2) 後藤ら: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動の FEM 解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.816-835, 2010. 3) 海老澤ら: コンクリート部分充填円形断面橋脚における高軸力比が耐震性能に与える影響, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, I-065, 2013. 4) Goto, Y., et al.: FEM analysis for hysteretic behavior of thin-walled column, *J. Struct. Engrg.*, Vol.124, No.11, ASCE, pp.1290-1301, 1998. 5) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008.

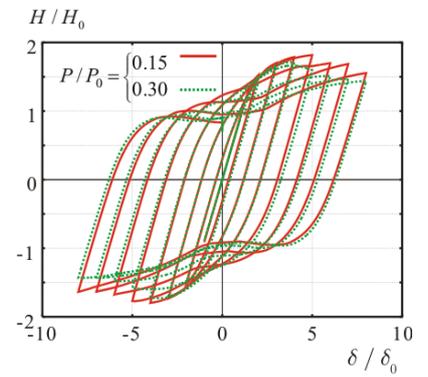


図 4 水平復元力-水平変位履歴関係

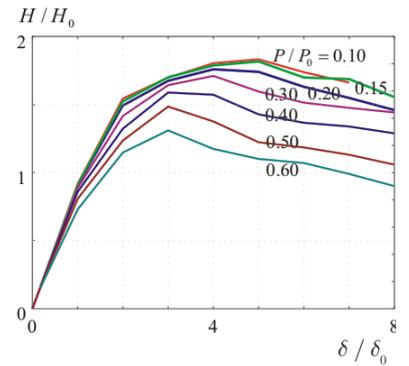


図 5 CFT 柱の包絡線

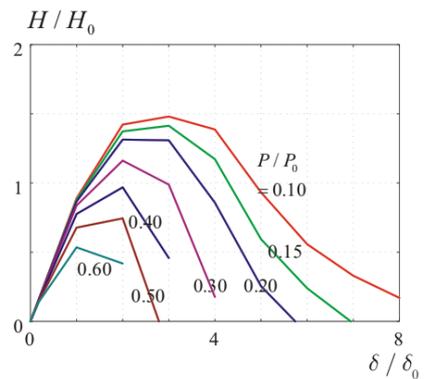


図 6 無充填鋼管柱の包絡線

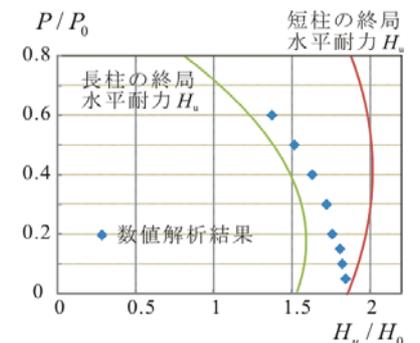


図 7 終局水平耐力と軸力比との関係