

断面コアに CFT を有する SRC 柱の耐震性に関する解析的研究

宇都宮大学 学生員 ○ 山口敬也 野口大智 正会員 藤倉修一
 正会員 Nguyen Minh Hai フェロー会員 中島章典

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震の発生以降、道路橋の耐震性能の照査はそれまでの震度法に代わり、新たに地震時保有水平耐力法が主に用いられるようになった。これにより、従来よりも大きな地震力に対して、予め想定した塑性ヒンジ部に損傷を限定することによって構造物の崩壊を防ぐ、という考え方になった。しかし、2011 年の東北地方太平洋沖地震において、想定以上の地震や津波が発生し、道路橋に壊滅的な被害が生じた。この被害を受けて、想定外の事象にも対処しようとする「危機耐性」の概念が検討されている。

本研究では、設計想定以上の地震力が作用しても崩壊しない柱構造として、鉄筋コンクリート柱 (以下、RC 柱と呼ぶ) の断面コアにコンクリート充填鋼管柱 (以下、CFT 柱と呼ぶ) を配置した鉄骨鉄筋コンクリート柱 (以下、新型 SRC 柱と呼ぶ) を提案する。一般的に橋脚が大変形を受けた場合、被りコンクリートの剥落後はコアコンクリートが圧壊し始めるが、提案する柱は、鋼管内部のコアコンクリートの損傷を防ぐことによって、落橋を防止することが可能になる。そこで、提案構造である新型 SRC 柱の地震時挙動を把握するために、正負交番繰り返し載荷実験を行い、ファイバー要素を用いた非線形解析を行った。また、比較のため RC 柱に対しても同様の実験および解析を行った。なおここでは主に、ファイバー要素を用いた非線形解析について示す。

2. 正負交番載荷実験

新型 SRC 柱および RC 柱の側面図と断面図を図-1 に示す。断面コア部の鋼管を除けば、両柱の配筋は同一である。供試体は道路橋示方書の地震時保有水平耐力法に基づき設計し、せん断スパン比は 3.14 である。両柱の軸方向鉄筋には D13(SD295)、帯鉄筋は D6(SD295) を用いた。軸方向鉄筋比は 1.65%、帯鉄筋比は 0.66% である。新型 SRC 柱には肉厚 1.6mm、外径 120mm の鋼管を用い、断面中央にフーチング底面から 1270mm の高さまで配置した。

正負交番載荷実験では、0.19N/mm² の初期軸応力を作用させた状態で、油圧ジャッキにより水平力を変位制御で与えた。また、載荷方向は S 面側が圧縮となる場合を正載荷、N 面側が圧縮となる場合を負載荷とした。ここで、降伏変位 δ_y は、柱基部付近における最外縁軸方向鉄筋のひずみがおおよそ降伏ひずみに達した時の載荷点における水平変位と定義し、RC 柱では 4mm、新型 SRC 柱では 4.8mm であった。本実験における載荷サイクルの繰り返し回数は RC 柱の場合では $1\delta_y \sim 5\delta_y$ を 3 回、 $6\delta_y \sim 8\delta_y$ を 2 回、 $9\delta_y \sim 15\delta_y$ を 1 回とし、新型 SRC 柱では $1\delta_y \sim 6\delta_y$ を 3 回、 $7\delta_y$ 、 $8\delta_y$ を 2 回、 $9\delta_y \sim 17\delta_y$ を 1 回とした。

3. ファイバー要素解析

解析モデルを図-2 に示す。両供試体の柱基部から上部ブロック上端までを 10 節点 9 要素でモデル化した。柱の塑

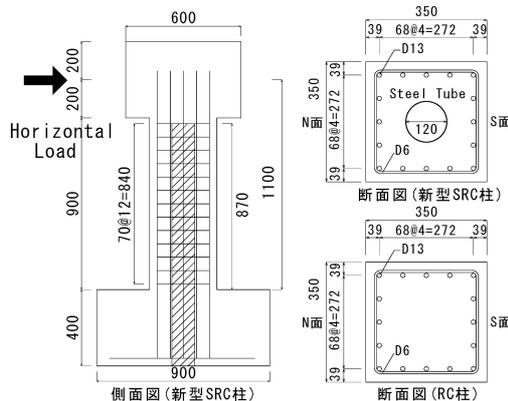


図-1 RC, 新型 SRC 柱

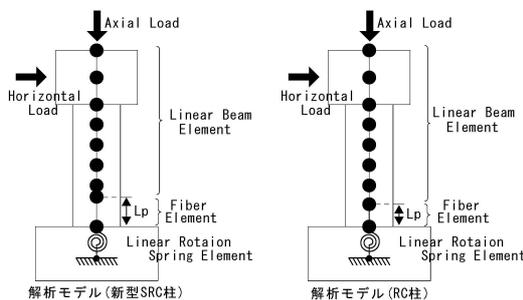


図-2 解析モデル

表-1 解析に用いた材料特性 (N/mm²)

	材料特性	RC 柱	新型 SRC 柱
コアコンクリート	最大圧縮応力 σ_{cc}	40.4	39.2
被りコンクリート	最大圧縮応力 σ_{cc}	38.6	37.6
軸方向鉄筋	降伏強度 σ_{sy}	361	
鋼管	降伏強度 σ_{sy}	-	282

性ヒンジ区間にはファイバー要素、塑性ヒンジ区間以外には線形はり要素を用いた。また、フーチングからの軸方向鉄筋の伸び出しが水平変位に与える影響を考慮するために、柱基部で計測した鉛直変位をもとに、線形回転ばねを用いてモデル化した。塑性ヒンジ長 L_p は、RC 柱では道路橋示方書に基づいて 175mm とし、新型 SRC 柱では 230mm とした。ファイバー要素でモデル化した塑性ヒンジ区間では、コアコンクリート、かぶりコンクリート、軸方向鉄筋、鋼管に分け、コアコンクリートを 121 分割、かぶりコンクリートを 120 分割、鋼管を 70 分割した。表-1 は解析に用いた材料特性で、材料試験に基づいて決めた。

コアコンクリートおよびかぶりコンクリートの応力-ひずみ関係の骨格曲線は、Hoshikuma らの提案式¹⁾に基づき、材料試験の結果を考慮して与えた。また、両コンクリートの除荷、再載荷履歴には堺らのモデル²⁾を用いた。

軸方向鉄筋及び鋼管の応力-ひずみ関係は、Bauschinger 効果を考慮できる Menegotto-Pinto モデルに堺らが修正を加えたモデル³⁾を用いた。Bauschinger 効果を表すパラメータは次式で表される。

$$R_b = R_{b0} - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (1)$$

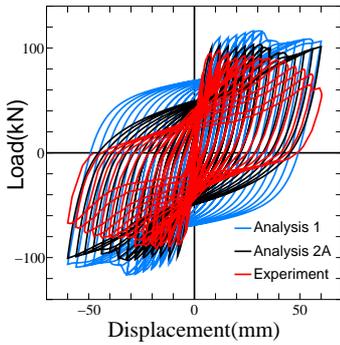


図-3 荷重-変位関係 (RC 柱)

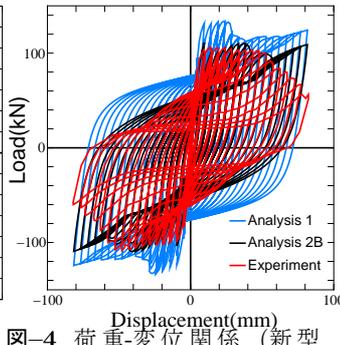


図-4 荷重-変位関係 (新型 SRC 柱)

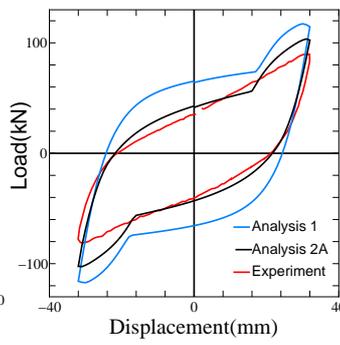


図-5 8δ_y 時の履歴 (RC)

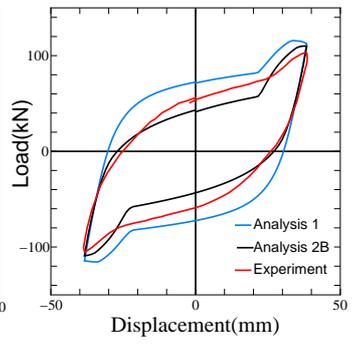


図-6 8δ_y 時の履歴 (新型 SRC 柱)

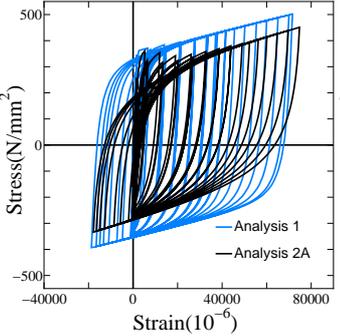


図-7 軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係 (RC 柱)

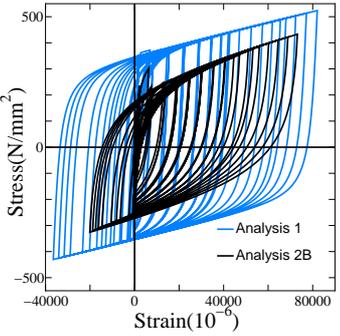


図-8 軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係 (新型 SRC 柱)

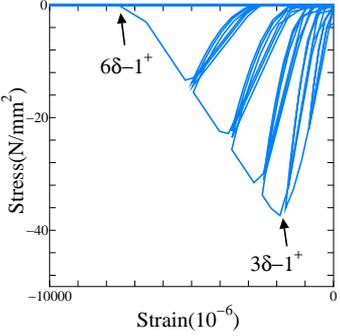


図-9 かぶりコンクリートの応力-ひずみ関係 (新型 SRC 柱-ケース 1)

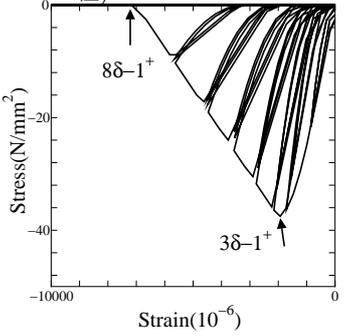


図-10 かぶりコンクリートの応力-ひずみ関係 (新型 SRC 柱-ケース 2B)

ここで、 R_{b0} 、 a_1 、 a_2 は除荷、再載荷時のひずみ軟化を表す材料定数であり、既往の研究でにおいて一般的には、それぞれ 20、18.5、0.15 が用いられることが多い。しかし、このパラメータを用いた解析では、実験結果との再現性が低いことが確認されたので、一般的なパラメータに加え、両供試体の履歴を比較的精度良く再現できるパラメータも示すこととした。RC 柱の鉄筋には $R_{b0} = 4.5$ 、 $a_1 = 3.8$ 、 $a_2 = 0.85$ 、新型 SRC 柱の鉄筋には $R_{b0} = 2.7$ 、 $a_1 = 2.0$ 、 $a_2 = 0.15$ 、鋼管には $R_{b0} = 19.5$ 、 $a_1 = 18.5$ 、 $a_2 = 0.45$ となった。ここでは、既存のパラメータを用いた場合をケース 1、RC 柱に調整したパラメータを用いた場合をケース 2A、新型 SRC 柱に調整したパラメータを用いた場合をケース 2B とした。

4. 解析結果及び実験結果との比較

(1) 荷重-変位関係

図-3,4 に実験と解析による荷重-変位関係を比較した結果を示す。図-5,6 は $8\delta_y$ 時の履歴である。RC 柱において、実験では軸方向鉄筋の降伏後、荷重が概ね一定になるのに対し、ケース 1 では降伏後も耐力が漸増しており、例えば図-5では、荷重を約 23% 過大評価している。これに対してケース 2A では、最大荷重後の耐力低下の大きさに差が見られるものの、初期剛性、除荷・再載荷履歴はある程度再現できていると考えられる。なお、変形が大きくなると、軸方向鉄筋が座屈する現象が生じているが、修正 Menegotto-Pinto モデルでは座屈を考慮していないため、実験よりは解析は荷重を大きく評価している。

新型 SRC 柱においてもケース 1 では RC 柱と同様に実験で得られた水平荷重を大きく評価している。これに対してケース 2B では包絡線、初期剛性、除荷・再載荷履歴を概ね再現できている。

(2) 軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係

図-7,8 に、それぞれ両供試体の塑性ヒンジ区間での軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係の履歴を示す。RC 柱、新型 SRC

柱ともにケース 2A、2B に比べるとケース 1 の履歴曲線は大きい。この軸方向鉄筋の差が、荷重-変位関係に大きく影響を及ぼしていると考えられる。

(3) かぶりコンクリートの応力-ひずみ関係

図-9,10 に、新型 SRC 柱の塑性ヒンジ区間中央におけるかぶりコンクリートの最外縁 (N 面) の応力-ひずみ関係の履歴を示す。かぶりコンクリートは、両供試体とも $3\delta_y$ の段階で応力が σ_{cc} に達している。コンクリートの圧縮応力が 0 になるときが、かぶりコンクリートの剥落を想定しているが、解析結果から、ケース 1 では $6\delta_y$ 、ケース 2B では $8\delta_y$ のときにかぶりコンクリートが剥落したことを示している。実際の載荷実験における損傷状況から、実験では $8\delta_y$ 載荷後にかぶりコンクリートの剥落の兆候が確認され、ケース 2B の方が実験結果に近い。

5. まとめ

本研究では、RC 柱および新型 SRC 柱を対象にファイバー要素解析を行い、実験結果との比較を行った。軸方向鉄筋を修正 Menegotto-Pinto モデルでモデル化した。一般的に用いられているパラメータでは、実験結果を再現できなかった。パラメータを調整した結果、ある程度、実験結果を再現することはできるが、パラメータの決め方には、まだ明らかになっていないところもあり、今後、詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A.W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, J.Struct.Engrg, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997.
- 2) 塚淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度~ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.297-316, 2000.7.
- 3) 塚淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.7.