

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	X 型鉄筋内蔵 CFT 柱の耐震性能に関する研究
研究者名※	蔡 高創
所属組織※	福岡大学 工学部建築学科 助教
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

## 大林財団2019年度研究助成実施報告書

所属機関名

福岡大学

申請者氏名

蔡 高創

研究課題	X型鉄筋内蔵 CFT 柱の耐震性能に関する研究
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>本研究では、大変形まで CFT 柱の局部座屈を効果的に制御すること及び大きな水平力がかかった CFT 柱の残留変形を制御することを解決するように、実験的及び解析的に X 形低付着強度超高強度鉄筋内蔵 CFT 柱の耐震性能を調査した。この柱は地震荷重下での柱の耐力と靱性を改善し、鋼管の局部座屈の発生を遅らせるための横方向拘束法を備えた革新的なコンファインド CFT 柱である。この鉄筋内蔵 CFT 柱はより高い回復力のあるより合理的な補強方法を使用する。本研究で提案する XRCFT 柱の応用に関しては、既存 CFT 部材を有するラーメン構造物の大変形までの耐震安全性を改善することができる。また、付着強度の低い超高強度鉄筋を用いて、主筋の周辺でのコンクリートの損傷が制限され、大変形まで XRCFT 柱の残留部材角を抑えることができ、CFT 造構造物の崩壊を避けることができる。研究結果に基づいて、X 形鉄筋補強により、CFT 柱の耐震性能と変形性能が大幅に向上し、特に大変形時の残留変形が効果的に抑制される。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究の目的は、地震荷重下での CFT 柱の耐力と靱性を改善し、鋼管の局部座屈の発生を遅らせるための横方向拘束法を備えた革新的なコンファインド X 形低付着強度超高強度鉄筋内蔵 CFT 柱を開発することである。この鉄筋内蔵 CFT 柱はより高い回復力のあるより合理的な補強方法を使用する。更に、実験調査に基づいて、提案された X 筋内蔵 CFT (XRCFT) 柱の耐震設計方法及び解析モデルを提案する。</p> <p>この研究は、XRCFT 柱の関連設計法を提案するために、一連の実験的研究とパラメトリック解析によって実施される。研究の内容は、次の 3 つの具体的な課題を解決するように計画される。(a) まず、大変形まで CFT 柱の局部座屈を効果的に制御する方法は何であるか; (b) 繰り返し荷重下 CFT 柱の耐力劣化は大変形まで効果的に制御可能か。(c) 大きな水平力がかかった CFT 柱の残留変形を制御することは可能か。</p>	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究の新規性として、付着強度の低い超高強度鉄筋は、交番繰り返し地震荷重下 CFT 柱の耐力劣化を制御するために、高強度定着板とナットとともに CFT 柱の内部に X 形配筋することが提案される。申請者の既往の研究より、この超高強度鉄筋の付着強度は普通の異形鉄筋の 1/3 程度であるため、アンボンド鉄筋と比較して、初期段階である程度付着を示して、柱の剛性を高めることが期待される。CFT 柱の内部で X 形に配置されるこれらの超高強度鉄筋の一部は、充填コンクリートのアーチ効果を高め、柱の水平変形に抵抗する。さらに、超高強度横拘束鉄筋を使用して、CFT 柱により強い横方向拘束を与え、初期荷重で柱の抵抗剛性を高めことも期待される。また、横拘束鉄筋の超高強度特徴により、大変形までの柱の横拘束効果が保証され、硬化型耐震挙動がもたらされる。</p> <p>(a) XRCFT 柱の耐震性能に関する実験調査</p>	

一定軸力と交番繰り返し水平力下の XRCFT 柱の弾塑性挙動を実験的に調査するために、柱の耐震性能に対するせん断スパン比、軸力比、横拘束筋各変数の影響を調べる。鋼管、X 形筋、平行主筋のひずみの進展と柱の変形も観察され、柱の抵抗メカニズム及び変形能力が分析される。(1) について、まず、材料の機械的性質及び XRCFT 柱の耐震性能に関する内容を実験的に調査して、地震荷重下 XRCFT 柱の抵抗機能が解明される。そのため、片持ち XRCFT 柱を 10 体製作し、せん断スパン比は 2.7 と 4.1 の 2 種類としており、柱の材長を変化させることにより調整する。軸力比は CFT 断面の圧縮耐力に対する作用軸力の比とし、0.1 と 0.33 とする。これらの軸力は鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準に規定された制限軸力の 0.28 倍と 0.85 倍程度である。試験体の境界条件は柱脚を固定して柱頭はピン支持である。载荷は福岡大学での 500tonf 万能試験機で柱頭に圧縮軸力を载荷し、一定に保持した状態で、水平力を部材角 3%rad. まで 0.5%rad. を単位とし、それ以降は 1%rad. を単位として、各変位振幅で 2 回繰り返す漸増変位振幅で準静的に载荷する。図 1 に試験体の配筋及び寸法を示す。

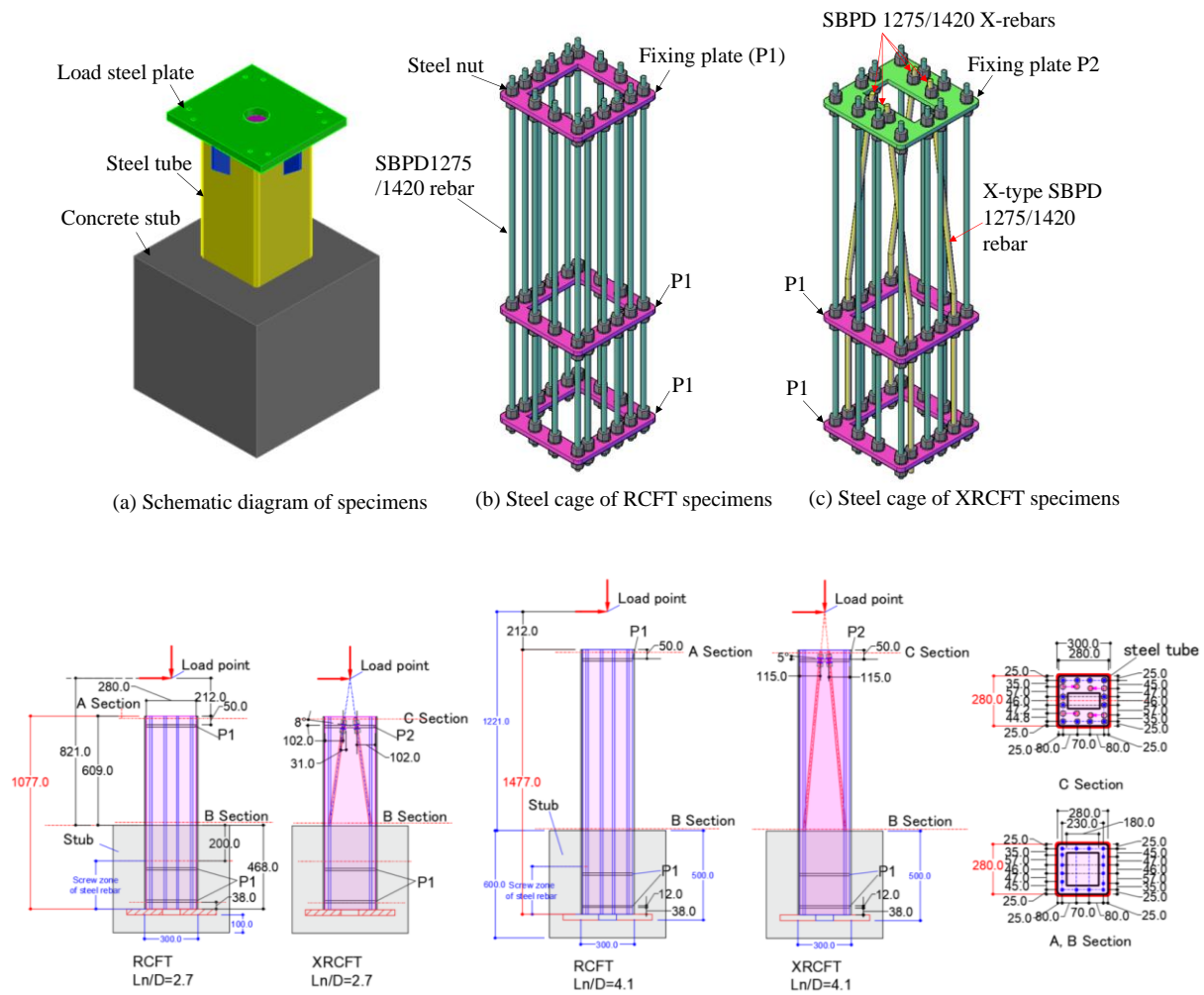


Fig.1 Details of specimens (in mm)

(b) 弾塑性解析モデルの構築

地震荷重下 XRCFT 柱の弾塑性性状をシミュレートするために、柱の実験結果と抵抗メカニズムに従って OpenSees に基づいた解析モデルが開発される。同時に、鋼管と内部コンクリートの損傷をシミュレートするために、ABAQUS に基づく FEM モデルも開発される。そのため、事前に選択された弾塑性解析モデルとして、二つの解析モデルが考慮される。解析モデル 1 は弾塑性ヒンジ領域と剛体からなるモデルを考え、柱部材の変形をヒンジ領域に集中させ、その点のモーメント曲率関係を元に、力の釣り合いを満足させることにより、柱の挙動がシミュレーションされる。ヒンジ領域で断面のモーメント-曲率関係は平面保持の仮定のもとで断面区分法により求める。一方、付着バネ領域と塑性ヒンジ領域で構成された弾塑性モデル 2 では、その付着バネ領域で鉄筋の付着すべりが考慮でき、ヒンジ領域

内での主筋ひずみは一樣と仮定する。そして、コンクリートのみ平面保持、及び変形は材端のヒンジ領域に集中することを仮定して解析する。実験結果との比較によって検証し、XRCFT 柱の弾塑性挙動をシミュレートするための最も良い解析モデルを提案する。ABAQUS に基づく FEM モデルはテスト後に行う柱の挙動分析を元に開発され、種々の変数において、充填コンクリートの損傷と鋼管の局部座屈に焦点を合わせて検討する。このモデルはさまざまな解析パラメータを設定することにより得られたシミュレートされた荷重-変位包絡線をチェックすることにより開発される

(c) パラメトリック解析とモデルの開発

開発された OpenSees 解析モデル及び解析手法によって、XRCFT 柱の耐震挙動に関するより多くの構造的要因を理解するためのパラメトリック解析を実行することである。それらの結果を持って、XRCFT 柱の耐力モデルや復元力特性の骨格曲線のモデルなどを開発する。FEM モデルに基づいて、さまざまな状況下での柱の損傷について議論し、柱の設計方法に関する関連の推奨事項を提案する。パラメトリック解析における主要変数は主筋比及び降伏強度、帯筋比と降伏強度、柱の断面、X 配筋率、横拘束筋間隔及び降伏強度、コンクリート強度、軸力比を含む。このパラメトリック分析によると、ヒステリシス挙動、降伏荷重、ピーク荷重、延性、エネルギー吸収能力、残留変形、ヒンジ領域の高さなどに対する各変数の影響の議論に焦点を当てる。それらの解析結果に基づいて、曲げひび割れ点、降伏点、最大耐力発揮点、最大耐力発揮後の劣化域にある点に及ぼす各変数の影響を検討し、XRCFT 柱の復元力特性の骨格曲線を回帰的に定式化することを行うおよび柱の耐力モデルを開発する。一方、FEM モデルによる解析によって、構造性能を最適化するために XRCFT 柱の設計を改善する。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

下記の通り、主要の研究結果を纏める。

(1) 損傷状況

CFT 柱の水平抵抗力は、通常、鋼管の座屈を起点として減少することはよく知られており、コンクリートの損傷は試験中に観察できないため、鋼の座屈に着目して試験片の損傷を分析した。例として、試験片 XRCFT-Fc40S40 の鋼管の部材角-2%、-3%、+4.5%における座屈損傷を図2に示す。メッシュの寸法図中の鋼管表面は 50mm×50mm であり、図に示すようにスタブ面から 100mm 離れた西側に最初の座屈が見られ、それ以前は主な損傷がスタブに集中していた。部材角の増加に伴い、西側と東側の鋼管の座屈が著しく発達した。鋼管の座屈領域は、スタブ面から 0~200mm に達し、部材角 4.5% では、東側の座屈が柱の南側に広がり、加えられた荷重も減少し始めた。2 方向の座屈損傷は、大変形段階で  $L_n/D$  比が大きいすべてのテスト柱で見られたが、短い柱では見られなかった。2 つの方向 CFT 柱では、鋼管の最初の座屈損傷に対応する部材角が、同じ  $L_n/D$  比の対応する RCFT および XRCFT 柱よりも早く観測された。

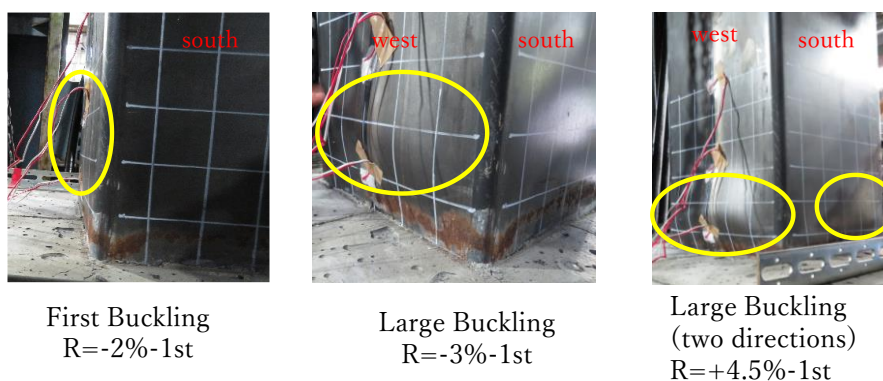


Fig.2 Buckling damage of Specimen XRCT-Fc40S40N10

## (2) 水平力—変位関係

CFT 柱に平行超高張力鋼棒のみを追加した場合、RCFT 柱の最大横方向抵抗力が増加し、鋼管の降伏に対応する柱の変形量は 1.5% のままであるが、部材角は変わらない。水平力最大時の部材角は大幅に増加しており、両柱の最大変形部材角はともに部材角約 4.0% に達し、試験終了まで 2 本の柱の極限状態は現れなかった。柱の残留変形レベルは CFT 柱に比べて改善されているが、それでも比較的大きく、最大水平力は両方とも増加している。長い RCFT 柱のヒステリシス曲線特性はフラットになる傾向があるが、短い RCFT 柱は、大きな D/t 比を使用する従来の CFT 柱に似ている。XRCFT 柱では、両柱の全鋼管の歩留まりを 2.0% 以上に延期し、残留変形を極めて小さく抑え、最大抵抗力を高めたことが最大の特徴である。水平力は RCFT 柱よりわずかに小さいが、CFT 柱に比べて力の増加は依然として大きい。同時に、柱のピーク荷重に対応する部材角も RCFT 柱に近い。

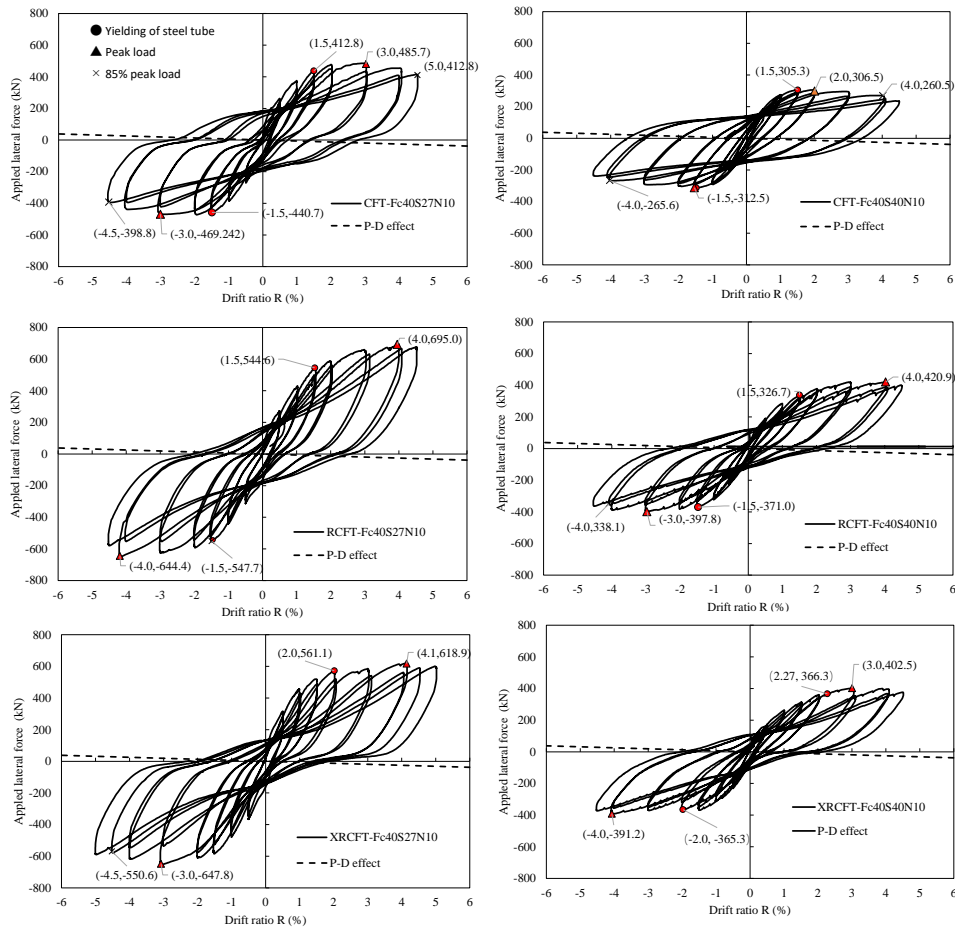


Fig. 3 Load-drift ratio curves of specimens

## (3) 包絡線の比較

Ln/D 比が同じであるすべての柱の包絡曲線を比較すると、耐力の違いと内部の超高張力鋼のプラスの影響をよりよく表すことができる。短い柱の場合、内蔵鉄筋の寄与は R=1.0% から現れ始め、R=4.0% で最大効果に達した。これは、D/t 比が大きい CFT 柱では、このような超高張力鋼棒の使用が非常に意味があることを示している。また、図 4 (a)からは、超高張力鋼を内蔵することで、大変形段階での柱の残留変形量を効果的に抑制できることがわかった。また、長柱も同様の変化と特性を示すが、長柱では曲げ変形が支配的であるため、超高強度補強材の方が地震後の残留変形の抑制に貢献できる。棒鋼の構成の違いによる違いは、短い柱に比べて長い柱ではそれほど明白なかった。

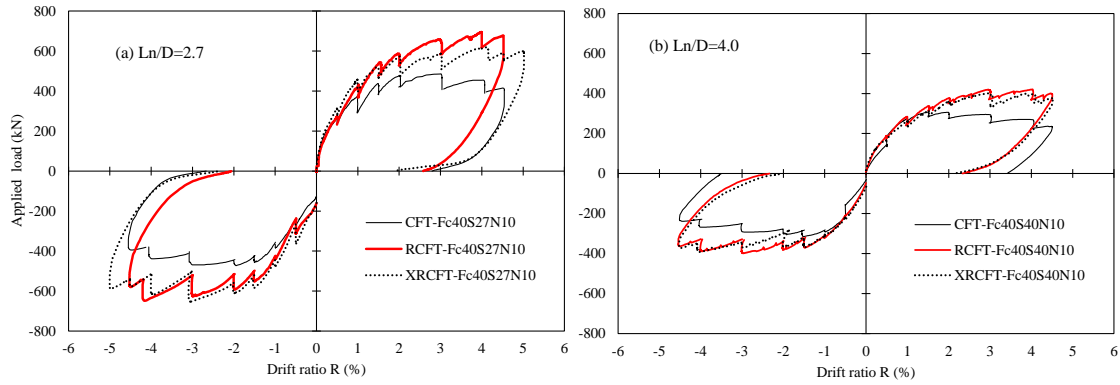


Fig.4 Envelop curves of load-drift ratio curves of specimens.

#### (4) 解析方法

重ね合わせ法とは、概念的には、特性の異なる 2 種類の材料を含む複合構造要素の総耐力を、同じ変位が加えられたときの各要素の寄与を単純に加算することで求める方法である。本研究では、RCFT および超高強度鉄筋を内蔵した XRCFT 柱の復元力特性を評価するために、簡易なハイブリッド重ね合わせ解析法を提案した。鉄筋付き CFT 柱の容量曲線は、鋼管柱と RC 柱の 2 つのパーツを重ねるだけで予測できる。大変形段階での外鋼管の座屈損傷がコアコンクリートの強化係数(コアコンクリートの有効横方向コンファインドに関連する係数)に悪影響を与える可能性があることを考慮すると、RC 柱の寄与の 90%は研究では、鋼管柱の降伏部材角 ( $R_y$ ) の後に、CFT 柱と棒鋼の合計耐力曲線を重ね合わせることが提案された。

この研究では、申請者による解析方法の仮定に基づいて、内部に充填された RC 柱の容量曲線がシミュレートされた。柱は、図 5 (a) に示すように、2 つのボンドスリップゾーンと 1 つのプラスチックヒンジゾーンを含む 3 つのゾーンに分割された。BSZ は、コンクリートと鉄筋の応力とひずみを分析するために特定のレイヤーにさらに分割され、PHZ は、ボンド - スプリング解析と断面モーメント  $M$ -曲率解析を含むハイブリッド有限要素解析を実行するために準備された。BSZ 解析では、BSZ 端部の鉄筋抜去(すべり)量と鉄筋応力を想定し、コンクリートと鉄筋の接合応力-すべり関係から、接合ばね要素間の関係を求め、次の収束計算を行った。鉄筋応力は、端部境界条件に従って計算された。

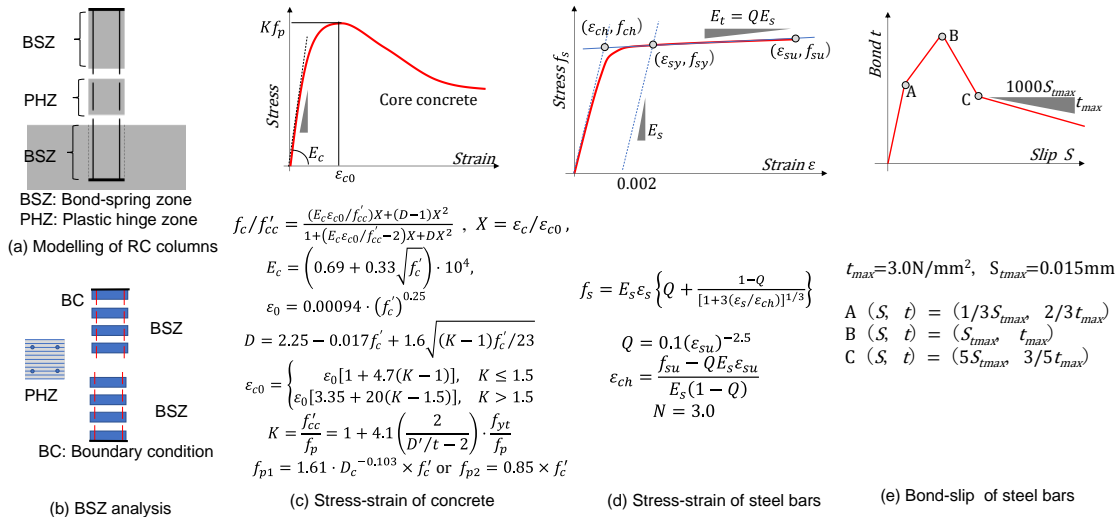


Fig.5 Analysis method and material models.

図 6 にプロットされている四体の RCFT 或いは XRCFT 柱の実験およびシミュレーションの耐力曲線の比較結果は、負の方向での XRCFT 柱の初期剛性がわずかに過小評価されていることを除いて、提案された解析モデルの評価精度を確認した。これは、負の方向の前に荷重効果によって形成された柱のヒンジゾーンにおける鋼管とコアコンクリートの残留塑性損傷によって説明された。すべての RCFT および XRCFT 柱の耐力曲線は、ドリフト率 3.0%のかなり前に評価された。内蔵の超高張力鋼棒によってもたらされた弾性力が、

Ln/D 比の小さい柱よりも高かったためである。図 6 にプロットされた結果は、鋼管柱の提案された双線形モデルの破断点としてドリフト比 1.5% を取ることが、RCFT と XRCFT の両方の柱の割線剛性と横力が合理的に予測されるために受け入れられることも証明しました。

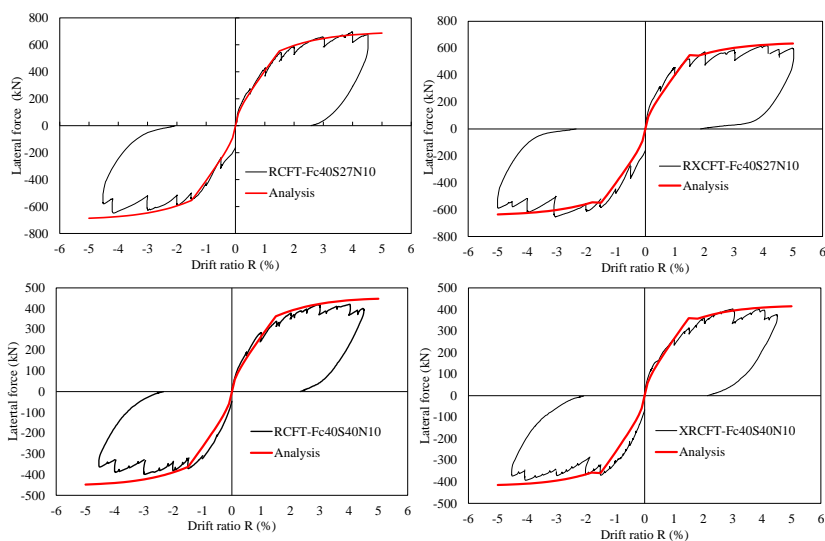


Fig.6 Comparison analysis of proposed numerical method with experimental results.

本研究に基づいて、下記の研究成果を公表予定する (2020.4-2022.3)

1. Cyclic behavior of XRCFT columns under simulated seismic loads. (2021. 5, Composite Struct.) 審査中  
本論文では *XRCFT* 柱の変形能力及び抵抗機能などを議論して、耐力の劣化性状及びモデルが報告される。
2. A parametric analysis of seismic performance of XRCFT columns based on OpenSees. (投稿予定)  
本論文では数値解析モデルを開発して、パラメトリックの解析結果によって *XRCFT* 柱の耐震設計方法が提案される。
3. A hysteresis model of XRCFT columns under seismic loads (2021.12, Eng. Struct.) (投稿予定)  
本論文では水平交番繰り返し荷重下 *XRCFT* 柱の復元力特性に関する研究結果が報告される。
4. Damage and deformation of XRCFT columns under seismic loads based on a FEM analysis. (2022. 3, Eng. Struct.) (投稿予定)

本論文では *FEM* 分析結果に基づいて *XRCFT* 柱の耐震破壊及びヒンジ領域高さなどの研究結果が報告される。

#### 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

この調査に基づいて、次の新しいトピックで X 強化 CFT 柱の調査を継続する。

- (1). X 筋比の異なる CFT 柱の耐震性能に関する研究。

本研究では、X 配筋比率が CFT の耐震性に及ぼす悪影響と、大変形領域での CFT 柱の残留変形の制御による有益な効果について具体的に検討する。

- (2). PC 筋強化された CFT 柱の耐震性能に関する研究。

また、今回の研究では、低付着の超高強度鋼棒の代わりに断面積の大きな高強度 PC 棒を使用することで、CFT 柱のより大きな復元力が得られ、残留変形を制御できる可能性があることが示されている。今後、この可能性を実験的及び解析的に研究する。

- (3). X 型鉄筋内蔵 CFT 逆対称柱の耐震性能に関する研究。

本研究では、逆対称柱における X 鋼棒と定着板の接合方法について、その信頼性、耐震性、変形などに注目する。