

ロ ヒ

氏 名 LYU FEI

学位の種類 博士 (工学)

学位記番号 博第1161号

学位授与の日付 2019年9月4日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 Segment Model of Seismic Behaviors of Circular CFT Bridge Piers  
(円型コンクリート充填鋼製橋脚の地震拳動のセグメントモデル)

論文審査委員 主査 教授 小畑 誠  
教授 野中 哲也  
教授 前田 健一  
教授 市之瀬 敏勝

## 論文内容の要旨

### Abstract :

Thin-walled partially concrete-filled tubular steel columns hereinafter referred to as thin-walled PCFT columns have come to be used as the piers of elevated-girder bridges widely in Japan because of their excellent seismic performance: strength, ductility, and energy dissipation capacity.

In the bridge structures, the loading condition of piers could be idealized as cantilever columns subjected to axial force and lateral load. Therefore, to have a better understanding of seismic performance of CFT piers, a comprehensive review study of experimental behaviors of CFT columns was conducted. An experimental database of CFT columns subjected to related load condition was built, consist of a wide range of design parameters including materials, dimensions and cross-section types. In some cases, the connection between columns and basement will become the critical site in the design. A review of studies focus on the rational designing of base to column connection is included. Moreover, to consider the seismic behavior of CFT columns in a more practical situation, relative investigation of dynamical loading test is introduced. According to this comprehensive review study, behaviors of CFT columns such as strength, ductility and collapse mode under the earthquake were concluded.

To consider the excellent seismic performance of CFT columns in design, it is essential to provide some analytical method to assess the ultimate behavior of the thin-walled PCFT columns by considering the cyclic local buckling of the steel tube, the behavior of the confined in-filled concrete with cracks and the interface action between the steel tube and in-filled concrete. During the past three decades, various types of analytical model have been proposed by different researchers. However, there is no related study on the compression between them.

Hence, an evaluation of current analytical models available in the literature of CFT columns was made. The existing fiber-based models of CFT columns are not so accurate especially for the performance based design. Up to the present, the shell-solid element model analysis has been the only numerical method that can be used to consider these complicated behaviors of the PCFT columns in a direct manner. However, the use of this model requires unrealistically long computation time and often encounters numerical difficulty to obtain convergent solutions, when applied to large structural systems such as the elevated-girder bridge systems with the multiple thin-walled PCFT piers. Therefore, the development of numerical approach of CFT columns, especially for large scale structural system is a meaningful research direction of structural engineering.

The objective of the present research is to propose a practical 3D fiber-based model with the failure segment that is computationally efficient, yet accurate enough to assess the ultimate behavior of the PCFT columns. This model is calibrated by an optimization technique, only referring to the in-plane hysteretic behavior of each single PCFT column calculated by the shell-solid element model analysis. The calibrated model is applicable to the seismic analysis of the large structural systems with the multiple PCFT piers under arbitrary multi-directional seismic accelerations. The accuracy and numerical efficiency of the proposed fiber-based model in the analysis of the PCFT columns were confirmed extensively by the comparison to the shell-solid element model analysis results and the results of tests, such as cyclic loading tests and shake table tests.

## 論文審査結果の要旨

CFT柱と呼ばれるコンクリートで内部を充填した薄肉鋼管柱は、その優れた耐震性能（強度、延性およびエネルギー吸収能力）のために、日本では高架橋の橋脚として一部使用されてきている。本論文はこのCFT柱の耐震性能を把握するための簡易で合理的な計算モデルを構築することを目的としている。本論文ではCFT橋脚の耐震性能をよりよく理解するために、CFT柱の実験的挙動に関する包括的なレビューを行っている。材料、寸法、断面タイプを含む広範囲の設計パラメータ、およびさまざまな荷重条件のCFT柱の実験結果および解析結果を調査データベースを構築している。これには実務上重要な論点となる基礎から支柱への結合の合理的設計に焦点を当てた研究のレビューも含まれている。さらに、より実用的な状況におけるCFT柱の地震時挙動を考慮するために動的載荷試験も含んでいる。このようなCFT柱に関する包括的なレビューはこれまでほとんどなされておらず、CFT柱の地震時の強度、崩壊モードあるいは関連した解析手法などについて優れた知見を与えている点が評価できる。

設計においてCFT柱の優れた耐震性能を考慮するためには、繰返し載荷時の鋼管の局部座屈、充填コンクリートに発生するき裂、さらには充填コンクリートと鋼管の界面の相互作用を考慮したCFT柱の終局挙動を正確に評価するため数値解析手法が必要である。これに関しては過去30年間、さまざまな解析モデルが提案されてきている。それらの解析モデルで実用的なものとしては、いわゆるファイバーモデルがあるが解析の精度は十分には高くない。一方、鋼管部にシェル要素と充填コンクリート部にソリッド要素を用いるモデルは適切な設定のもとで高精度の解をあたえるが、非現実的な計算時間を要する場合があり、連続高架橋システムのように規模の大きい解析対象については解析を遂行することはほとんど不可能に近い。本論文では、実用的な計算時間でCFT柱の挙動を正確に再現するために、ファイバーモデルにもとづく3次元のセグメントモデルを提案した。このモデルはCFT柱の複雑な挙動を正確に再現するためには18個程度の材料パラメータを持つが、精度の高いシェルソリッド要素モデルによる単一CFT柱の面内履歴挙動解析結果をレファレンスとする最適化手法によって材料パラメータを決定している。そしてこうして決定した材料パラメータを使えば、任意の多方向地震加速度の下で複数のCFT橋脚を有する連続橋システムの地震解析に十分な精度で適用できることを具体的に示している。CFT柱の解析における提案したモデルの計算効率、シェルソリッド要素モデルの2000~3000倍となっており、実用的な価値もきわめて高い。本論文のこれらの成果は国際会議論文1報、およびASCE（米国土木学会）のジャーナルに1報、掲載された。以上から呂飛氏は博士（工学）に十分に値すると判断する。