

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04337

研究課題名(和文) コンクリート充填構造のポストピーク域の挙動を考慮できる高精度簡易解析法と耐震照査

研究課題名(英文) High-precision simple analysis method and seismic verification that can consider the post-peak behavior of the concrete filled structure

研究代表者

川西 直樹 (Naoki, Kawanishi)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号：60300589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまで鋼製断面柱にコンクリートを充填した構造(CFT構造)は、最大荷重以降の力学挙動を簡便に推定する手法が確立されていなかった。本研究では、簡易かつ精度よくCFT構造の最大耐力以降の挙動を追跡するための独自の手法を新たに提案し、既往のCFT構造の実験結果や精緻なFEM解析結果と比較することでその精度を検証した。この結果から提案モデルにより最大荷重以降の領域についても精度よくCFTのマクロ的な力学挙動を追跡できることを明らかにした。さらに、提案モデルを用いたCFT橋脚を有した連続高架橋の合理性の高い新たな耐震設計法についても提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー吸収能に優れたCFT構造は鋼材の非線形性に加えてコンクリートと鋼の接触挙動など複雑な非線形挙動が表れるため、最大荷重以降の力学挙動を簡便に推定する手法が確立されていなかった。本研究では、簡易かつ精度よくCFT構造のポストピーク域の力学挙動を追跡可能なモデルを独自開発し、世界ではじめてその精度検証に成功した。さらに、この簡易モデルを利用することでCFT構造を含んだより複雑な構造物の応答計算も可能になるため、残存耐力に基づいた直接的で精度の高い耐震設計法についても提案できたため、より自由度の高い経済的なCFT構造の構築に寄与できたものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Until now, for structures in which concrete is filled in steel cross-section columns (CFT structure), a method for easily estimating the mechanical behavior after the peak load has not been established. In this study, we proposed a new unique method for tracking the behavior of the CFT structure after the peak load easily and accurately, and compared it with the experimental results and FEM analysis results of the existing CFT structure to improve its accuracy. From these results, it was clarified that the proposed model can accurately trace the macrodynamic behavior of CFT even in the region after the peak load. We also proposed a new seismic design method with high rationality for continuous viaducts with CFT piers using the proposed model.

研究分野：構造工学

キーワード：コンクリート充填構造 CFT 簡易解析 耐震設計 連続高架橋 ポストピーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼構造の断面内にコンクリートを充填する構造(以下、CFT構造)は、図-1のように無充填構造に比べ繰り返し荷重のピーク点以降においても安定したエネルギー吸収能を持ち、高い耐震性能を有していることが知られている。しかし、現行の耐震照査法ではピーク点以降の優れた耐震性能が十分反映されていない。ピーク点以降の挙動では、鋼管の局部座屈、コンクリートと鋼の接触・離間、拘束応力下のコンクリートの強度増加、さらに、同一断面での鋼とコンクリートの平面保持が成り立たずひずみが独立することなどを考慮する必要があり複雑である。このため、CFT構造のピーク点以降の挙動を予測できる汎用性のある3次元簡易計算モデルは開発されていない。

既存の耐震照査のための簡易モデルとして、M-モデルや合成断面はりモデルが挙げられるが、これらはピーク以降に生じる鋼の局部座屈が考慮されておらず、同一断面での鋼とコンクリートにもその簡便性から平面保持の仮定が設けられているためピーク以降の挙動を正しく扱えずCFT柱の特長を考慮することができない。

CFT柱の現行の耐震照査は、[地震時の応答変位(曲率)の最大] [限界変位(曲率)] による無充填構造と同様な変位照査法が採られており、限界変位は静的1方向漸増繰り返し荷重で定められる。しかし、CFT柱の場合、図-2のように荷重履歴の違いにより応答変位(応答曲率)が変動し、とくにピーク点以降に限界点を定めた場合、その変動量は非常に大きくなる。このため、応答変位(応答曲率)を指標とする照査法ではピーク以降の安全性が十分確保できない可能性がある。

CFT構造のピーク点以降のエネルギー吸収能を耐震設計の中で考慮するには、ピーク点以降のCFT構造の応答を精度よく評価できる簡易解析ツールとともに適切な耐震安全照査法が必要となる。なお、ピーク点以降のCFT構造の挙動が扱える高精度の解析ツールとして、申請者が提案した3次元FEモデルが挙げられるものの、膨大な計算量が必要となるため、設計解析ツールとして現在の計算機環境では現実的ではない。

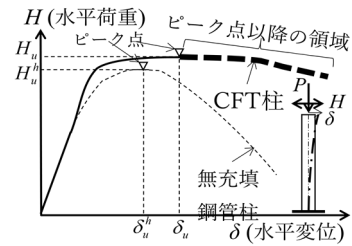


図-1 CFT柱と無充填柱の繰り返し荷重時の包絡線の比較

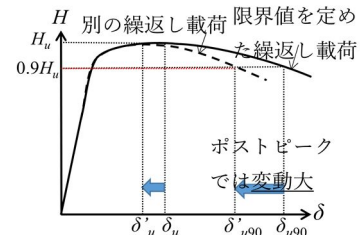
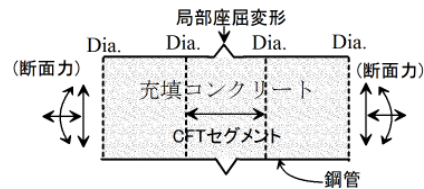
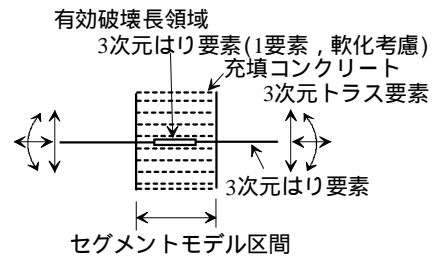


図-2 CFT柱の荷重履歴の違いによる限界変位の変動



(a) CFT 構造部材



(b) CFT セグメントのモデル化

図-3 CFT 構造の3次元セグメントモデル

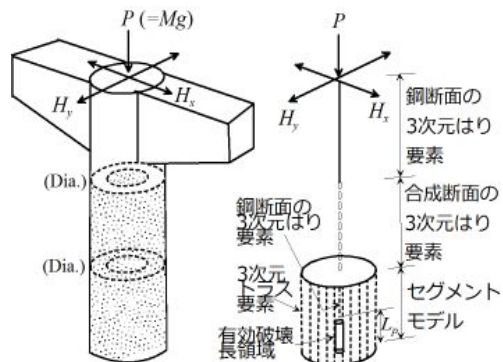


図-4 セグメントモデルのCFT橋脚への適用

2. 研究の目的

CFT構造のポストピーク挙動を簡易に算定するため、鋼の局部座屈変形が生じるダイヤフラム間の1つのセグメントを対象とした独自で新たな簡易計算モデル（3次元セグメントモデル）（図-3）を提案する。図-4はこれをCFT橋脚に適用した例である。このモデルは、鋼の局部座屈を有効破壊長領域の材料構成則により考慮し、鋼とコンクリートのひずみを独立に扱うことからピーク点以降においてもコンクリートのひずみが適切に評価されるため、従来までの簡易モデルに比べ、力学的な矛盾が少ない。さらに、本モデルはCFT柱のみならず、CFT構造全般にも適用可能であり汎用性も高い。

提案するセグメントモデルでは、a)有効破壊長領域の長さ、b)有効破壊長領域の1軸の鋼管の材料構成則、c)コンクリートの構成則などの複数の内部パラメータを適切に定める必要があるが、これらの各パラメータについては、セグメントを含む部材モデルの静的な1方向繰り返し載荷による挙動の精緻なFE解析や実験結果とセグメントモデルによる計算結果が整合するよう、最適化計算で同定する（図-5）。

本研究では、提案したセグメントモデルについて既往の実験結果や精緻なFE解析結果と比較することでポストピーク域までの力学挙動の予測精度の検証を行う。さらに、提案モデルを用いたCFT構造の合理的な耐震設計法について提案することを主な目的とする。

3. 研究の方法

(1)CFT 橋脚の解析によるセグメントモデルの精度検証

円形断面と箱断面のCFT橋脚について提案したセグメントモデルを適用し、既存のFEモデルによる解析結果や実験、連続高架橋の加振実験などで

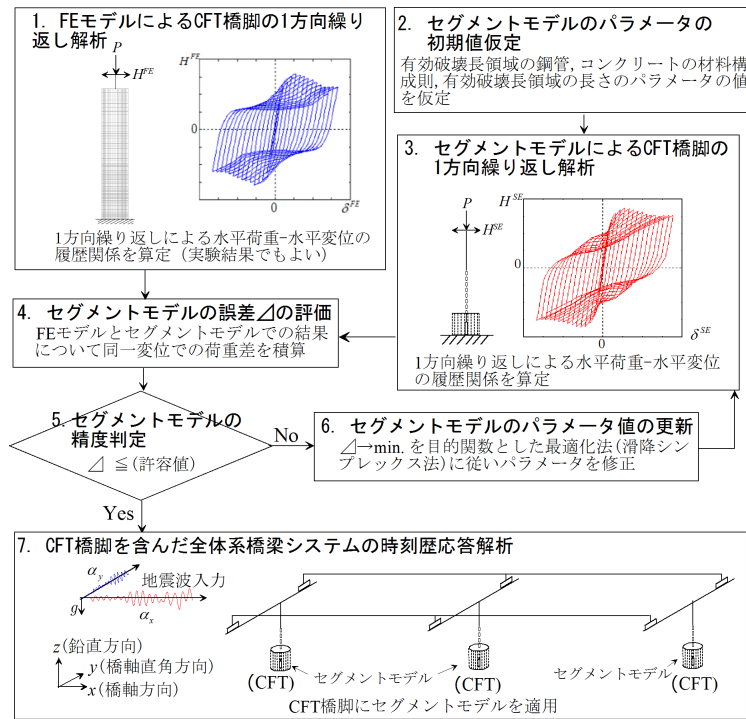


図-5 パラメータ同定と全体系高架橋システムへの適用フロー

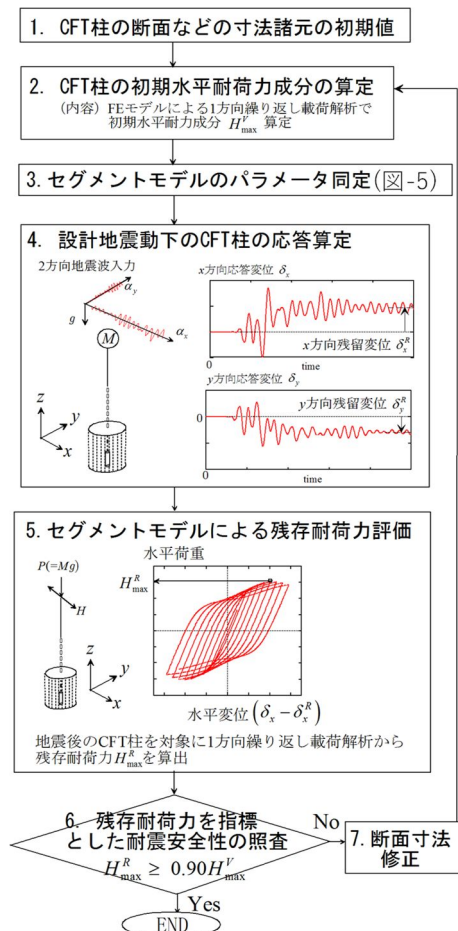


図-6 CFT柱の残存耐力を指標とした耐震安全性照査法のフロー

るだけ多くの結果と比較することで、様々な構造パラメータをもつ CFT 構造に対するセグメントモデルの精度を検証する。

(2) CFT 橋脚の残存耐荷力を指標とした合理的な耐震安全照査法の提案

CFT 橋脚の照査法で限界値として変位(曲率)を用いるとピーク点以降では荷重履歴の影響を大きく受けるので、耐震安全性が十分確保されない恐れがある。ここでは、照査指標として CFT 橋脚の耐荷力(最大荷重)に着眼し、地震前の初期耐荷力 H_{max}^V に対し、入力地震動の作用を受けた後の橋脚が保持する残存耐荷力 H_{max}^R が、 $H_{max}^R \geq 0.90H_{max}^V$ を満たすことを直接確認する新たな耐震照査法を提案する(図-6)。ここで、CFT 橋脚の初期耐荷力、残存耐荷力いずれも繰り返し载荷により評価する。上記の方法で CFT 橋脚のピーク点以降の耐震性能を考慮できるとともに、構造安全性も直接的に照査ができる。この照査法での耐震解析ツールとしてすべてセグメントモデルを用いるが、精緻な FE モデルを用いた耐震解析と比較して精度を検証する。

4. 研究成果

提案した CFT 構造の簡易解析モデル(3次元セグメントモデル)を単一の CFT 橋脚に適用し、水平2方向にらせん载荷したときの精度検証結果の一例を図-7 に示す。これより、提案モデルを用いることで高い精度で CFT 構造のマクロ的な力学挙動をポストピーク領域まで予測できることが判明した。

つぎに、この提案モデルを大規模な連続高架橋の加振実

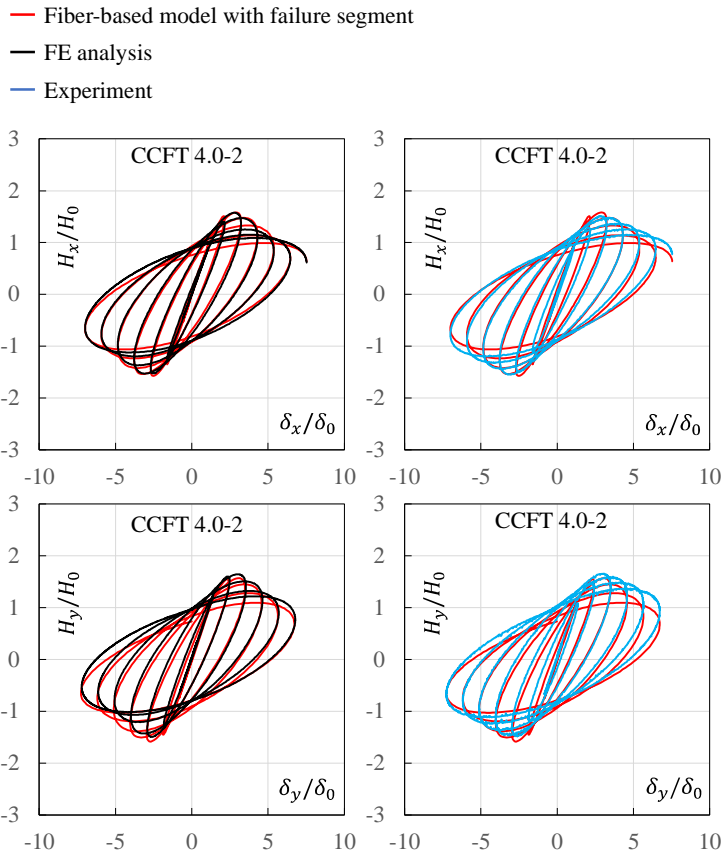
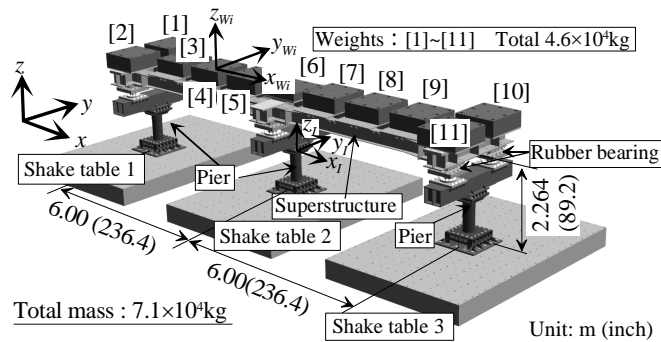
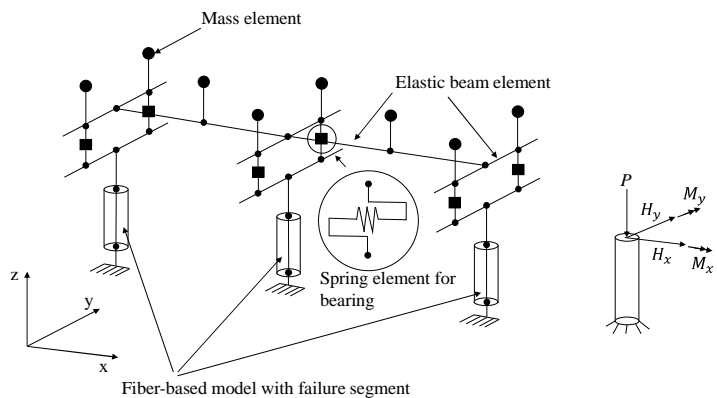


図-7 単一 CFT 橋脚にらせん载荷したときの提案モデルの精度検証結果の一例



(a) 実験模型



(b) 簡易解析モデル

図-8 連続高架橋の大規模加振模型と簡易解析モデル

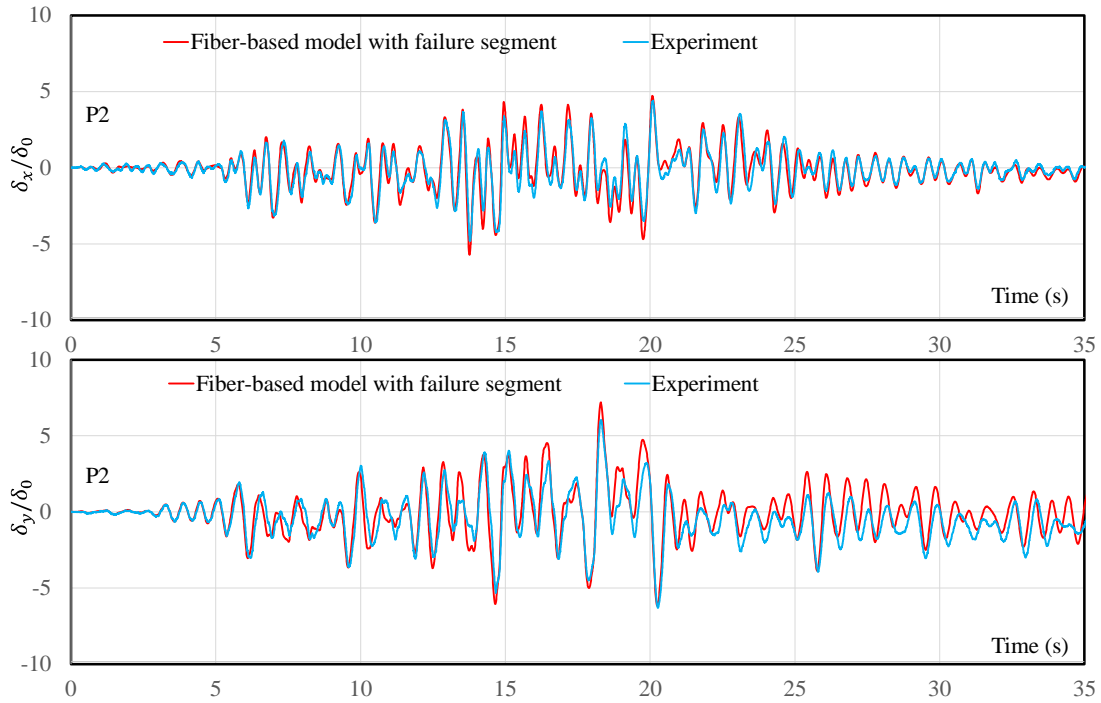


図-9 中央橋脚の応答水平変位の比較

験(図-8(a))の CFT 橋脚に適用(図-8(b))し,加振実験の再現解析を実施した.中央橋脚の水平 2 方向の変位の応答履歴について解析結果と実験結果の比較を図-9 に示す.この結果より,提案したセグメントモデルを CFT 橋脚に用いた簡易解析モデル(図-8(b))により,大地震を受ける連続高架橋の地震応答のマクロ挙動を精度よく予測できることが明らかとなった.

図-6 に示した提案モデルを用いた残存耐力に基づいた合理的な CFT 構造の耐震設計法を適用した場合について検討した結果を図-10,11 に示す.図-10 は地震力の大きさと単一 CFT 橋脚の残存耐力の関係を軸力比毎に整理した結果である.これより,提案モデルを用いると地震後の CFT 構造の残存耐力を直接的に求めて評価することが可能であることを示唆した.図-11 は既存の耐震照査法と提案した耐震照査法による照査結果の差異を示したものである.この結果から,既存の耐震照査法によると,地震後の CFT 橋脚の残存耐力については危険側や安全側な評価になってしまう場合があることを示唆した.以上の研究成果は,土木学会の鋼・合成標準示方書にも地震後の残存耐力を指標とした新たな CFT 構造の耐震照査法としても紹介されている.

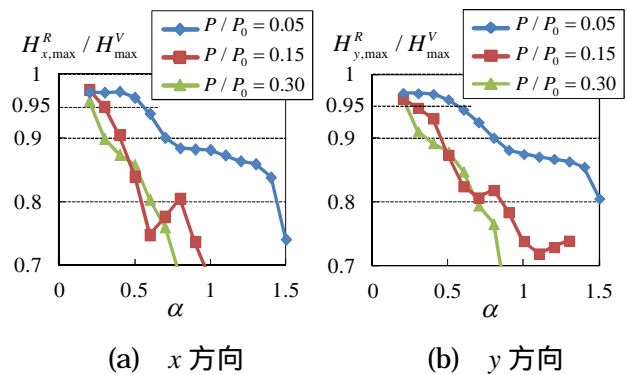


図-10 残存耐力と加速度拡大倍率 α の関係

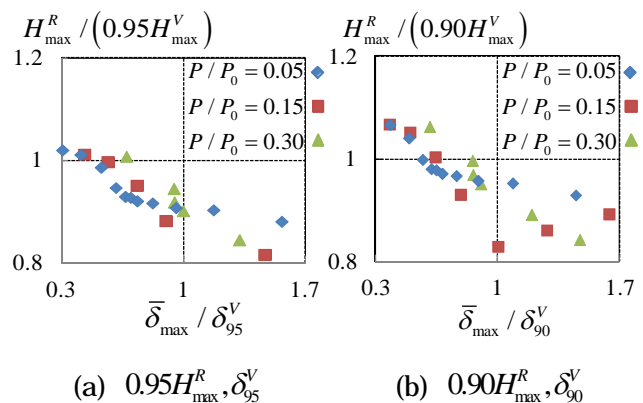


図-11 残存耐力と最大応答変位の照査値の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fei Lyu, Yoshiaki Goto, Naoki Kawanishi, and Yan Xu	4. 巻 146(1)
2. 論文標題 Three-Dimensional Numerical Model for Seismic Analysis of Bridge Systems with Multiple Thin-Walled Partially Concrete-Filled Steel Tubular Columns	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ASCE, J. Struct. Eng.	6. 最初と最後の頁 1,16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 川西直樹, 後藤芳顯, 海老澤健正	4. 巻 22
2. 論文標題 連続高架橋模型の加振実験によるT型と逆L型コンクリート充填鋼製橋脚の崩壊に至る挙動説明と解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 187,194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中村 稜也, 川西 直樹	4. 巻 52
2. 論文標題 コンクリート充填された鋼製柱の耐震照査用解析モデルの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 豊田工業高等専門学校研究紀要	6. 最初と最後の頁 8,11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20692/toyotakosenkiyo.52-2	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 後藤芳顯, 川西直樹, Lyu Fei, 海老澤健正, Yan Xu	4. 巻 21
2. 論文標題 コンクリート充填鋼製橋脚で支持された2径間連続高架橋模型の加振実験による終局挙動と崩壊挙動の特性と3次元セグメントモデルの適用性について	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 47,54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川西直樹, 後藤芳顯
2. 発表標題 極大地震により損傷を受けた連続高架橋 CFT 橋脚柱の残存耐力の算定法
3. 学会等名 土木学会年次講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水野雅之, 後藤芳顯, 海老澤健正, 川西直樹
2. 発表標題 CFT化したSM570鋼による既設橋脚の塑性履歴挙動と耐力上昇の抑制法
3. 学会等名 平成30年度土木学会全国大会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川西直樹, 後藤芳顯, F e i L y u
2. 発表標題 3次元セグメントモデルによるCFT橋脚を有する連続高架橋加振実験の再現解析
3. 学会等名 平成30年度土木学会全国大会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鋼・合成構造標準示方書耐震設計編小委員会	4. 発行年 2018年
2. 出版社 丸善	5. 総ページ数 321
3. 書名 鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------