

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：92103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04247

研究課題名 (和文) 鉄筋コンクリート橋脚の新たな靱性向上工法(HDP工法)の研究

研究課題名 (英文) Research on a new toughness improvement method for reinforced concrete piers

研究代表者

興石 正己 (Koshiishi, Masami)

日本工営株式会社中央研究所・中央研究所・研究員

研究者番号：70809318

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,200,000 円

研究成果の概要 (和文) : RC橋脚の靱性率を向上させるため、通常のRC橋脚(タイプ1)と橋脚基部の鉄筋を曲げ加工したHDP橋脚(タイプ2)の正負交番載荷実験を実施した。その結果タイプ1では靱性率は $\mu=6.5$ 、タイプ2では $\mu=7.2$ であった。実験ではHDP橋脚の軸方向鉄筋が変位 $7.8y$ 時に面外方向へ座屈したため予想値を下回った。次に非線形FE解析によりタイプ2のパラメトリックスタディーを行った。パラメータとしては曲率半径、曲げ加工区間長、横方向鉄筋比を採用し、それぞれの影響係数 $\alpha_1\sim\alpha_3$ を求めた。その結果タイプ2の靱性向上率は海洋型地震に対してはタイプ1の1.44倍、直下型地震に対しては1.65倍であることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義 : RC橋脚の基部における軸方向鉄筋を内向きに曲げ加工することにより、靱性率を従来の1.7倍程度まで向上させることに成功した。その結果、学問的にコンクリート構造工学における新たな地平を築くとともに、学術水準の向上に資することができた。

社会的意義 : 高靱性RC橋脚を実現し社会資本へ展開することにより、国土強靱化の推進、大規模地震に対する安全性向上を図った。例えば、Tラーメン橋では直下型地震により断層が発生し橋台が移動した際には橋脚が傾き崩壊に至るが、本技術を展開することにより従来の1.7倍程度傾いても崩壊を防止でき、復旧性の向上、交通寸断により二次被害の防止に資することが可能となった。

研究成果の概要 (英文) : In order to improve the toughness ratio of RC piers, positive and negative cyclic loading tests were conducted on ordinary RC piers (Type 1) and HDP piers with bent steel bars at the pier bases (Type 2). The results showed that the toughness factor of Type 1 piers was $\mu=6.5$, while that of Type 2 piers was $\mu=7.2$. In the experiment, the out-of-plane buckling of the axial bars of the HDP piers at a displacement of $7.8y$ resulted in a lower toughness ratio than expected. Next, a Type 2 parametric study was performed using nonlinear FE analysis. The parameters used were radius of curvature, length of bent section, and ratio of transverse reinforcement bars, and their influence coefficients $\alpha_1\sim\alpha_3$ were calculated. The results show that the toughness improvement ratio of Type 2 is 1.44 times higher than that of Type 1 for oceanic earthquakes and 1.65 times higher than that of Type 1 for direct earthquakes.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：国土強靱化 高靱性橋脚 Pre-Deform技術 軸方向鉄筋の座屈抑制 2段階釣合い式

1. 研究開始当初の背景

大規模地震時における鉄筋コンクリート橋脚（以下RC橋脚という）の靱性率（エネルギー吸収性能）を向上させ、想定以上の地震力や断層に対しても倒壊しないRC橋脚を実現することは、国土強靱化に大きく貢献できる研究課題の一つである。

RC橋脚の靱性に関する既往の研究としては、①帯鉄筋を多用することによる軸方向鉄筋のはらみ出し抑制工法、②内巻スパイラル鉄筋による内部コンクリートの拘束による軸方向鉄筋のはらみ出し抑制工法、③高靱性セメントを用いた材料的な対策工法等が実施されているが、設計者が必要と判断した靱性率を具体的に確保するまでには至っていなかった。さらに、海外でのシンポジウム等でも研究代表者の知る限り有効な対策は発表されていない状態であった。

2. 研究の目的

現在の設計法では、RC橋脚の靱性は帯鉄筋や内巻スパイラル鉄筋により確保（図-1）されている。しかしながら、RC橋脚の崩壊メカニズムにおいては、①帯鉄筋の緩み②軸方向鉄筋のはらみ出しの後に③座屈が発生することにより④耐力が低下し倒壊に至るため、靱性率を設計段階で数値的に把握することは困難であった。本研究では、上記の状況に鑑み、RC橋脚の塑性ヒンジ部における軸方向鉄筋を予め内向きにR加工（Pre-Deform）する（図-2）ことにより、ポストピーク域における釣合い構造式（図-3）を成立させ、はらみ出しを防止することにより、靱性率を向上できるHT橋脚（High Toughness Pier）の実現を目的としている。

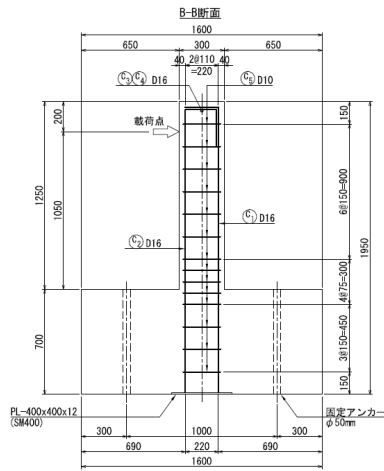


図-1 従来のRC橋脚

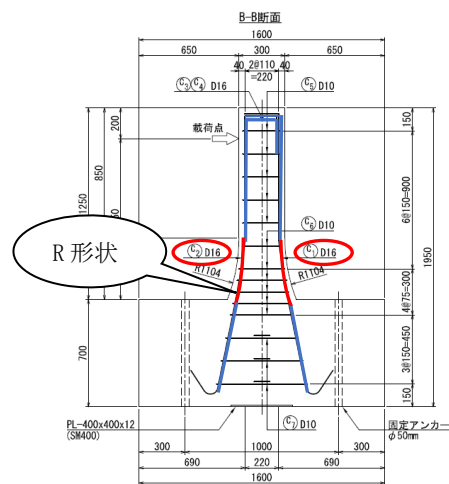


図-2 HT橋脚

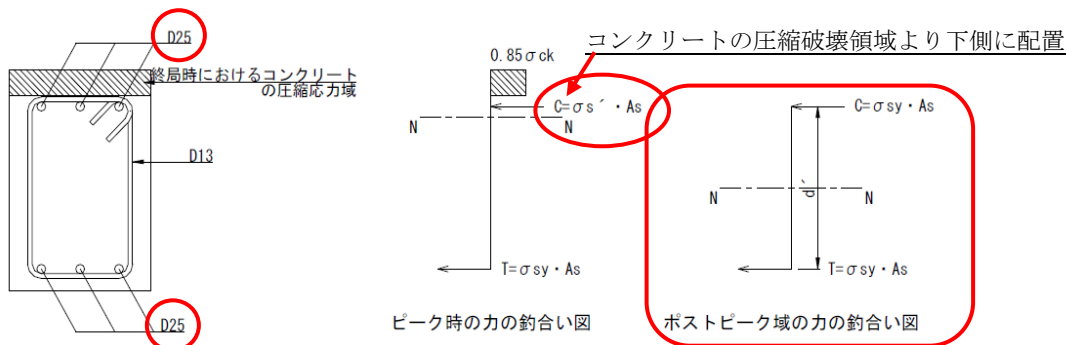


図-3 高靱性RC梁の断面図及び2段階釣合い構造式

次に、従来よりRC橋脚の靱性率を直接的に設計で定めることは困難であった。そこで、本研究課題では、高靱性橋脚（HTP）の靱性率を直接ではなく、従来のRC橋脚に対する比率（以下、靱性倍率という）で定式化することを試みた。今回、新たに提案した靱性評価式を式-1に示す。

$$\mu = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \mu_0 \quad \text{----- 式-1}$$

ここに、 μ : HT橋脚の靱性率
 μ_0 : 通常のRC橋脚の靱性率（基準靱性率）
 α_1 : 軸方向鉄筋の曲げ半径に関する影響係数
 α_2 : 軸方向鉄筋の曲げ加工区間長に関する影響係数
 α_3 : 横方向鉄筋の体積比に関する影響係数

この評価式における影響係数 α_1 から α_3 を適切に定めることにより、設計時における HT 橋脚の靱性向上率を定式化し、世界に通じる靱性向上工法を確立することを最終的な目標とした。

3. 研究の方法

3年間(令和3年4月～6年3月)の研究期間において、以下の3項目を実施した。

実施項目①：HT 橋脚における課題の再確認、設計プログラムの作成

実施項目②：HT 橋脚の試験体の設計、正負交番載荷実験の実施

実施項目③：HT 橋脚の靱性評価式の定式化、報告書のまとめ

(1) 研究代表者等は、令和3年度に最新の文献調査等により RC 橋脚の崩壊過程を再精査し、Pre-Deform 鉄筋の形状、ひずみ硬化の影響を考慮した設計プログラムを作成した。次にこれを用いて実験試験体の設計を行い、RC 橋脚および HT 橋脚の正負交番載荷実験(写真-1)を実施した。

(2) 令和4年度には、RC 橋脚および HT 橋脚の正負交番載荷実験のシミュレーションを非線形 FE 解析(図-4)を用いて実施した。その際、FE 解析結果と実験結果に乖離が発生しない最適な解析パラメータの設定を慎重に検討した。

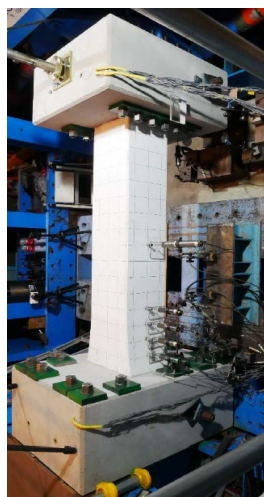


写真-1 HT 橋脚の正負交番載荷実験状況

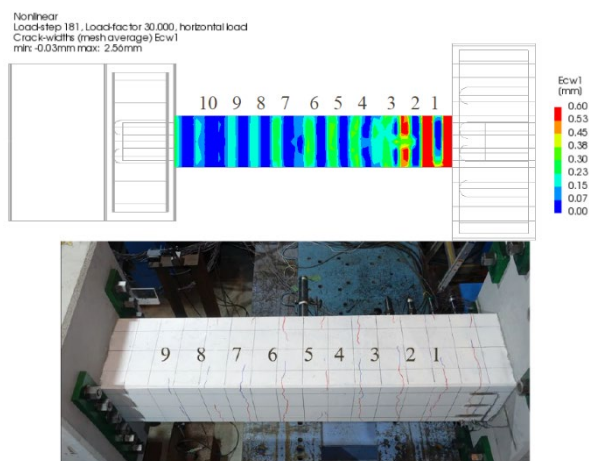


図-4 非線形 FE 解析によるシミュレーション

(3) 令和5年度には、HT 橋脚が RC 橋脚に対して示す靱性向上効果を非線形 FE 解析により検証した。この際、HT 橋脚における軸方向鉄筋の曲げ半径、曲げ加工区間長、横方向鉄筋の体積比をパラメトリックに変化させた解析を実施し、靱性評価式(式-1)の定式化を実施した。最後に、3年間の成果を取りまとめ報告書を作成するとともに、九州大学へ学位論文としての申請手続きを行った。

4. 研究成果

(1) Pre-Deform 鉄筋の応力ひずみ曲線の検証

HT 橋脚の軸方向鉄筋は、橋脚基部において一定の曲げ半径に応じた Pre-Deform 加工を行う必要がある。この際、曲げ半径が比較的小さい場合には残留ひずみが発生するため、原点ではなく図-5に示す A 点から応力が発生する。

正負交番載荷実験では、引張時よりも圧縮時のほうが発生ひずみが大きくなるため、引張時では図-5に示す A→B→C→E→A のループを描き、圧縮時では A→B→D→F→A のループを描くことになる。

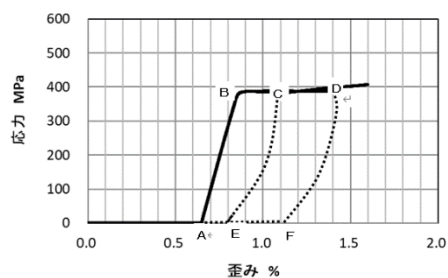


図-5 Pre-Deform 鉄筋の応力ひずみ曲線

(2) HT 橋脚の設計プログラムの作成

HT 橋脚では、橋脚基部において軸方向鉄筋の Pre-Deform 加工を実施するため、塑性ヒンジ領域の中心位置において有効高さを定める必要がある。設計手順を以下の4段階で示す。

①配筋量、初期有効高さ D^0 を定めた後に、所定の曲げ半径、曲げ加工区間に対応した加工形状を求める。

②Pre-Deform 加工による鉄筋ひずみを求め、ひずみ硬化域に達している場合には鉄筋強度を変更し①へ戻る。

③曲げ加工を考慮した有効高さ D^1 を求め①へ戻る。

④n+1 回目と n 回目の有効高さの比率が 3.0%程度に収束した状態で設計を完了する。

上記の手順を Excel で一括して実施できる設計プログラムを作成し、実務展開への基礎資料とした。

(3) 正負交番载荷実験による靱性率の検証

従来の RC 橋脚と HT 橋脚の実験試験体をそれぞれ製作し、正負交番载荷実験を行った。

その結果、RC 橋脚の降伏変位は $\delta y=22.5\text{mm}$ であり靱性率は $\mu=6.47$ であった。一方、HT 橋脚の降伏変位は $\delta y=18.8\text{mm}$ であり靱性率は $\mu=7.19$ (実験の靱性倍率 1.11) であった。

今回の正負交番载荷実験では、HT 橋脚において当初想定していた靱性向上は確認されなかった。この原因は、HT 橋脚における軸方向鉄筋が変位 $7\delta y$ において、载荷方向と直角方向 (面外方向) へ座屈したことに起因していると考えられる。

(4) 非線形 FE 解析による実験結果のシュミレーション

非線形 FE 解析は、汎用プログラム DIANA を用いて RC 橋脚及び HT 橋脚を対象として、変位制御方式により実施した。RC 橋脚におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線を図-6 に、軸方向鉄筋の応力-ひずみ曲線を図-7 にそれぞれ示す。また HT 橋脚におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線を図-8 に、Pre-Deform された軸方向鉄筋の応力-ひずみ曲線を図-9 に示す。さらに軸方向鉄筋の付着性能曲線 (CEB-FIP 2010) を図-10 に示す。

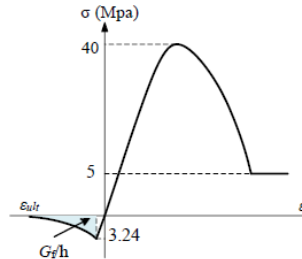


図-6 コンクリートの
応力-ひずみ曲線 (RC 橋脚)

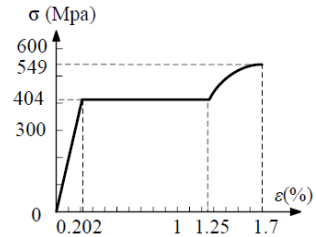


図-7 軸方向鉄筋の
応力-ひずみ曲線 (RC 橋脚)

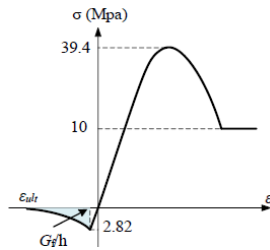


図-8 コンクリートの
応力-ひずみ曲線 (HT 橋脚)

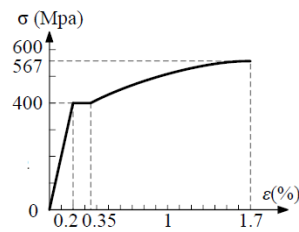


図-9 軸方向鉄筋の
応力-ひずみ曲線 (HT 橋脚)

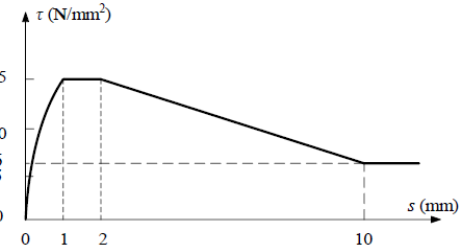


図-10 軸方向鉄筋の付着曲線
(CEB-FIP 2010)

次に RC 橋脚の非線形 FE 解析と正負交番载荷実験の比較結果を図-11 に、同様に HT 橋脚の比較結果を図-12 にそれぞれ示す。FE 解析においては、解析パラメータを調整することにより初期剛性、降伏荷重およびその変位、最大荷重およびその変位、靱性率等に関して実験結果との調和を図った。その結果、FE 解析値は実験値とほぼ一致しており、RC 橋脚における降伏変位は $\delta y=24.0\text{mm}$ であり靱性率は $\mu=5.00$ であった。一方、HT 橋脚の降伏変位は $\delta y=24.3\text{mm}$ 、靱性率は $\mu=5.45$ (解析の靱性倍率 1.09) であり、実験とほぼ同等の靱性倍率が確認された。

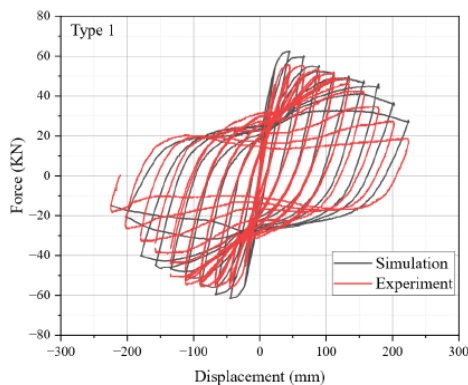


図-11 RC 橋脚のシュミレーション結果

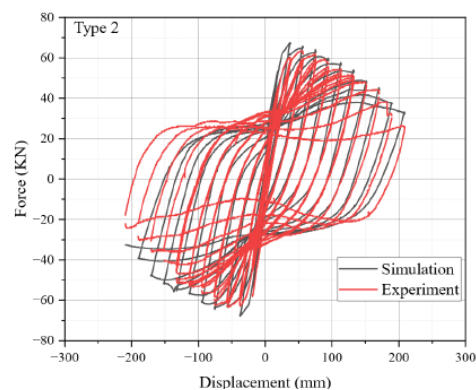


図-12 HT 橋脚のシュミレーション結果

(5) 非線形 FE 解析による影響係数 α_1 、 α_2 、 α_3 の検証

HT 橋脚における靱性率に関する影響係数としては、式-1 に示す軸方向鉄筋の曲げ半径に関する影響係数 α_1 、軸方向鉄筋の曲げ加工区間長に関する影響係数 α_2 、横方向鉄筋の体積比に関する影響係数 α_3 が挙げられる。ここでは、それぞれの係数に関して FE 解析によるパラメトリックスタディ (P. S.) を行い、その最大値を検討した。

まず、曲げ半径に関しては、横軸を Pre-deform 変位と塑性ヒンジ中心の断面高さの比に設定し、縦軸に RC 橋脚に対する HT 橋脚の靱性倍率を FE 解析により求めた。その結果を図-13

および図-14 に示す。両図より HT 橋脚の靱性率は Pre-deform 変位 $30\delta y$ (Case3) にて最大値 7.22 (靱性倍率 1.44) となることが確認された。

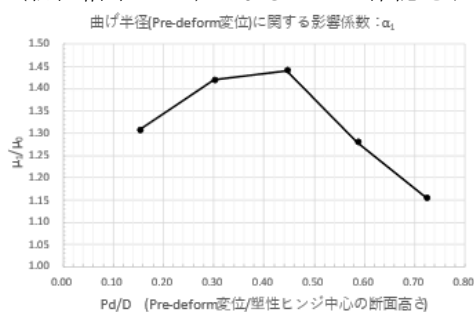


図-13 曲げ半径に関する FE 解析結果

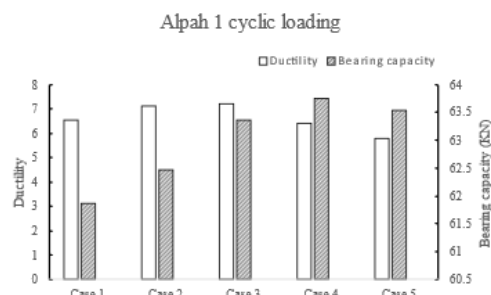


図-14 各ケースの靱性率と曲げ耐力

次に、曲げ加工区間長に関しては、横軸に曲げ区間長と塑性ヒンジ中心の断高さの比を設定し、縦軸に α_1 の最大値に対する靱性倍率を FE 解析により求めた。その結果を図-15 および図-16 に示す。両図より HT 橋脚の靱性率は曲げ加工区間長 0.62D にて最大値 7.22 (靱性倍率 1.00、Case2) となることが確認された。

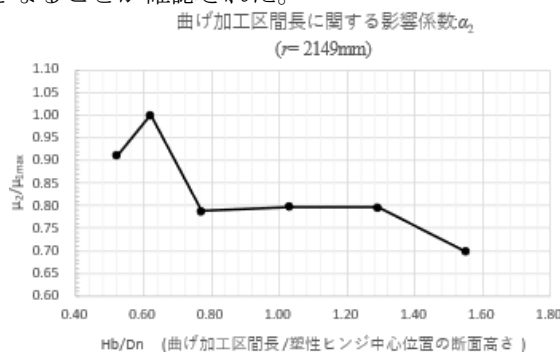


図-15 曲げ加工区間長に関する FE 解析結果

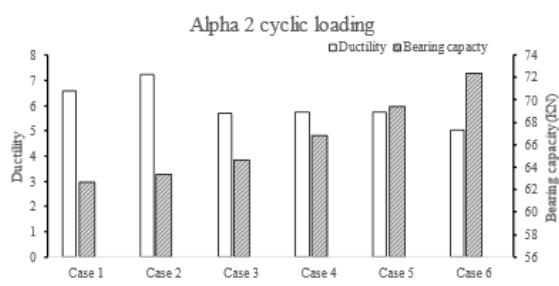


図-16 各ケースの靱性率と曲げ耐力

さらに、横方向鉄筋の体積比に関しては、横軸に横方向鉄筋の体積比を設定し、縦軸に α_2 の最大値に対する靱性倍率を FE 解析により求めた。その結果を図-17 および図-18 に示す。両図より HT 橋脚の靱性率は横方向鉄筋の体積比 1.54% で最大値 7.22 (靱性倍率 1.00、Case4) となることが確認された。

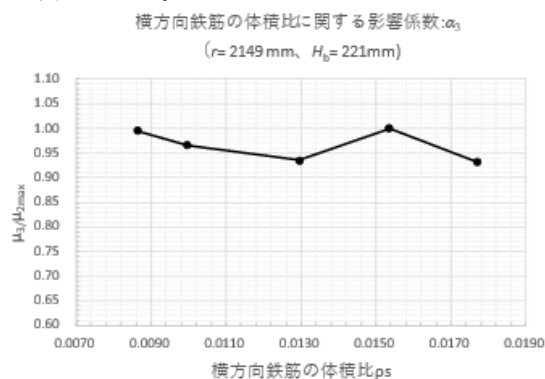


図-17 横方向鉄筋の体積比に関する FE 解析結果

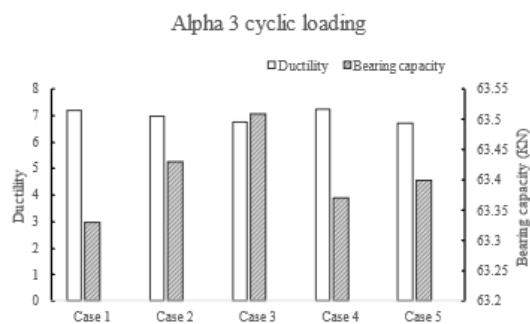


図-18 各ケースの靱性率と曲げ耐力

(6) まとめ

海洋型の繰返し地震動を対象としたサイクル載荷では、HT 橋脚の靱性向上率は、非線形 FE 解析より求められた $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ をそれぞれ式-1 に代入することにより算定可能となる。しかしながら靱性の向上要因としては、軸方向鉄筋の径に関する影響係数 α_4 、かぶりに関する影響係数 α_5 も考慮する必要があるとあり、今後の課題と考えられる。また、内陸直下型地震動を対象とした一方向載荷に対しても同様の手法により、RC 橋脚に対する靱性向上率を検討する予定である。

<引用文献>

- ① 興石正己, 玉井宏樹, WangWenming, 園田佳巨: RC 橋脚の靱性向上対策と正負交番載荷実験による効果の検証, 令和 5 年度土木学会全国大会, 講演概要集 V 巻, P797, 2023. 9
- ② WangWenming, 玉井宏樹, 園田佳巨, 興石正己: Nonlinear FE analysis for cyclic loading tests of RC pier model with measures to improve toughness, 令和 5 年度土木学会全国大会, 講演概要集 V 巻, P798, 2023. 9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 富安龍一、玉井宏樹、園田佳巨、Wang Wenming、興石正己	4. 巻 I (024)
2. 論文標題 RC橋脚の靱性向上策の提案と正負交番実験による効果検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会西部支部研究発表会 講演概要集	6. 最初と最後の頁 47 48
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 富安龍一
2. 発表標題 RC橋脚の靱性向上策の提案と正負交番実験による効果検討
3. 学会等名 土木学会西部支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 興石正己
2. 発表標題 RC橋脚の靱性向上対策と正負交番実験による効果の検証
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wang Wenming
2. 発表標題 Nonlinear FE analysis for cyclic loading tests of RC pier model with measures to improve toughness
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 高韌性RC構造物	発明者 奥石正己	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、P7375087	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔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
研究分担者	玉井 宏樹 (Hiroki Tamai) (20509632)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	園田 佳巨 (Yoshimi Sonoda) (40304737)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	浜田 秀則 (Hidenori Hamada) (70344314)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

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
---------	---------