

令和 4 年 5 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04706

研究課題名(和文) 鉄筋とコンクリート間の付着挙動を考慮した鉄筋コンクリート部材の復元力特性評価法

研究課題名(英文) Restoring Force Characteristics of RC Members based on Bond Behavior

研究代表者

杉本 訓祥 (Sugimoto, Kuniyoshi)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：60758233

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)：本研究では、鉄筋コンクリート部材の履歴復元力特性における、鉄筋とコンクリート間の付着挙動との関係について実験的に検証した。スラブ付き梁を主たる対象とし、また、実験においては、主筋とコンクリート間の相対変位(ずれ量)の計測に重点を置いて計画した。多数回の繰返し載荷を受ける梁部材の主筋について、定着部分と部材スパン内それぞれでずれ量を計測した。定着部の抜け出しや、付着割裂余裕度が小さい場合の相対変位などを計測し、付着特性と復元力特性におけるスリップや耐力低下との関係を確認した。様々な実験を対象として非線形FEM解析を実施し、付着特性の適切なモデル化により復元力特性評価を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋コンクリート造建物の地震時挙動把握のため復元力特性の適切な評価は重要である。そして、耐震性能向上のためには、エネルギー吸収能力の高い履歴曲線が有する必要があるが、付着特性と履歴曲線の関係の明確化は充分ではない点が課題である。本研究で得た実験データに基づき、付着特性を適切にモデル化し、解析精度が向上することは、これらの課題の解決につながる。本研究により、付着特性は、定着部や部材内のほか、スラブや非構造壁などの梁に取り付く要素の影響も受けることが確認されており、さらなる適用範囲の拡大が必要である。これらの学術的意義は、構造設計に展開していくことで安全な建物を社会に提供できることにつながる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of the bond behavior of reinforcing bar in concrete on the hysteretic restoring force characteristics of the reinforced concrete members was investigated. In particular, the main target was T-shaped beam with slab, and the experiments focused on the measurement of the relative displacement between the main bar and concrete. For the main bar of RC beam subjected to multiple cyclic loadings, the slip displacement was measured at the anchoring part or midspan. The pull-out displacement of the anchored part or the relative slip displacement of the beam with low bond split capacity were measured, and it is assumed that bond characteristics effected on slip behavior or decreasing of load capacity in the restoring force characteristics. Non-linear FE analysis was carried out for various experiments, and it was possible to evaluate the restoring force characteristics by appropriately modeling the bond characteristics.

研究分野：建築構造・材料, 構造工学, 鉄筋コンクリート構造

キーワード：付着応力度 付着すべり スリップ挙動 スラブ付き梁 多数回繰返し載荷実験 非線形FEM解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、鉄筋コンクリート造の柱梁骨組で、梁にスラブが取り付けいた一般的形状を対象とする。地震により多数回の繰返し外力を受ける鉄筋コンクリート造架構の履歴復元力特性(履歴曲線)は、理想的には紡錘形を描くとされており、地震応答解析で用いられる数値計算用の履歴モデルも紡錘形に近い形状が用いられる。しかし、部材実験では、性能の良くない逆S字状のスリップ挙動を示す場合がある。2012年の縮小20層RC造建物試験体の震動実験結果では、現行の標準的な設計であるにも関わらず層の履歴曲線に逆S字状のスリップが見られ、骨組モデルの解析では、紡錘形モデルでは応答変位を過小評価し、スリップモデルを用いなければ実験のような過大な応答が再現できなかったが、要因は明らかにされていない。これは耐震設計における応答予測精度が不十分であり、危険側であることを示している。

部材の履歴曲線が逆S字状になる要因のひとつとして、柱梁接合部における損傷が考えられる。このうち、近年発見された接合部降伏現象が要因の場合は、柱の梁に対する耐力余裕度を充分大きく確保することで改善できる。一方、梁降伏先行型でも梁の接合部内通し主筋の付着性能が低い場合に、鉄筋の抜け出しに伴うスリップが生じる。さらに、スラブ付き梁は、スラブが付く上端側の主筋に比べて、下端主筋は、より厳しい高応力状態となり、平均付着応力度が高くなり、すべり量が大きくなると考えられる。架構の履歴曲線に対して、主筋の付着性能はどの程度影響を及ぼすか、これに関してスラブはどう考慮すべきか、といった点が、これまでに明らかにされていない大きな研究課題であり、鉄筋コンクリート造架構の耐震安全性の検証や、性能向上のために明確化すべき重要な疑問点といえる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、鉄筋コンクリート造建物が大地震時に非線形応答する際に、エネルギー吸収能力の高い理想的な履歴特性を保有させるために必要な部材仕様を明確化することである。特に、鉄筋とコンクリート間の付着応力～すべり関係に関して必要な条件を、実験的に明らかにすることである。具体的には、ラーメン架構において、大地震時に大きな塑性変形が生じる梁や梁端ヒンジ領域と柱梁接合部を対象とする。梁主筋の定着性能(接合部内通し配筋の付着を含む)に着目した構造実験により、梁通し主筋の付着強度の作用応力に対する余裕度と履歴曲線の関係を明らかにし、理想的な履歴曲線を得るための付着設計を可能とする。

3. 研究の方法

(1) 実験的検討：静的載荷実験における付着すべりの計測

鉄筋コンクリート造のスラブ付き梁部材試験体を製作し、多数回の繰返し載荷実験を行う。特に、主筋とコンクリート間の相対変位の計測を主たる目的のひとつとし、付着性能の良否や履歴復元力特性に関するデータを取得する。第1年度には2体、第2年度には1体のスラブ付き片持ち梁部材試験体を製作し、繰返し載荷実験を実施した。なお、第2年度には、他の研究助成を受けて比較可能な試験体1体を製作し、併せて実験しており、合計4体のスラブ付き片持ち梁部材試験体の実験を実施した。試験体一覧を表1に示す。また、2019年度の載荷状況を写真1に、試験体配筋詳細の例を図1にそれぞれ示す。

(2) 解析的検討：付着のモデル化手法の検証

実験を対象とした非線形FEM解析を行い、主筋とコンクリート間の付着特性のモデル化方法に関するスタディや、履歴復元力特性の再現性の検証を行う。第1、第2年度に実施した合計4体を対象とした解析を実施した。解析モデル図を図2、図3に示す。

さらに、別の目的で実施された実験において、付着劣化挙動が特徴的であったため、この試験体を対象とした非線形FEM解析を行い、主筋の付着モデルの最適化を検証した。解析対象について図4に示す。雑壁の有無を変動した梁部材において、雑壁の有無により破壊挙動に変化が見られた。スラブが影響することと同様に付着性状への雑壁の影響が推察されたため、付着特性のモデル化を検討し、履歴復元力特性や破壊挙動を適切に再現する最適なモデルを検証した。

表1 2019～2020年度に載荷実験を行った試験体一覧

	Bo40	Bo65	Bo65L	Bo65U
梁部材	B×D=250×300, a(スパン)=625 主筋: 3-D16(SD345)上下		B×D=250×300, a(スパン)=625 主筋: 4-D16(SD490)	
スラブ	幅700mm, 厚さ80mm, 4-D6(SD295A)		幅700mm, 厚さ80mm, 4-D6(SD295A)	
スラブ位置	下端側に配置(上下反転)		下端側配置	上端側配置
あばら筋	2-D6@40(SD295A)	2-D6@65(SD295A)	2-D6@65(SD295A)	
載荷履歴	R=1/100, 1/50, 1/33, 1/25, 正負各2回	R=1/100, 1/50 正負各10回	R=1/200を正負各2回繰返し, R=1/100, 1/50, 1/33, 1/25は正負各3回	
(共通)	R=1/200を正負各2回繰返し, 上述の載荷を行った後, R=1/10程度まで正方向に載荷			
	2019年度		2020年度	2020年度(別財源)

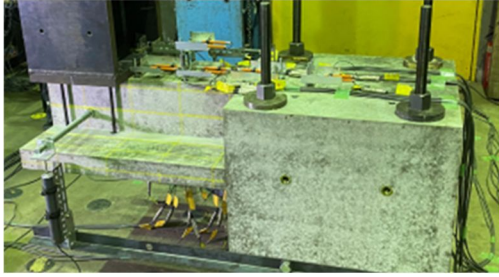


写真1 载荷状況

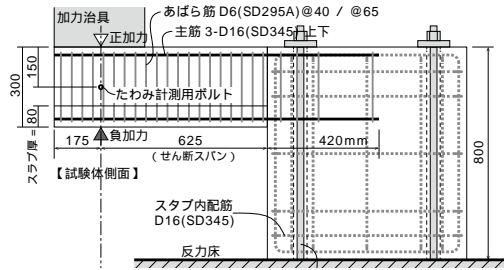


図1 試験体の形状寸法 (Bo40, Bo65)

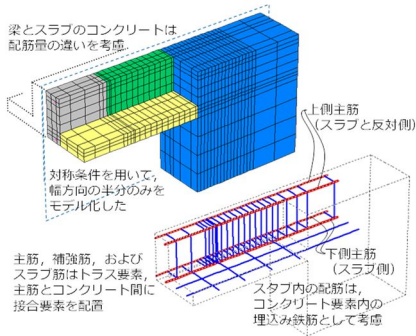


図2 解析モデル (2019年度試験体)

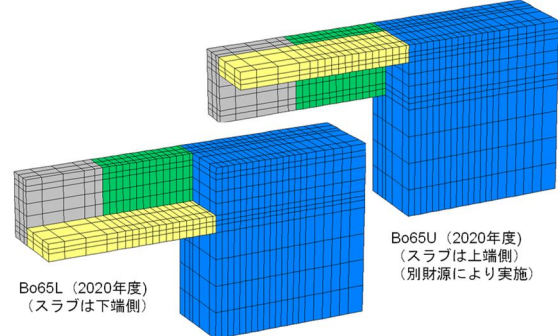


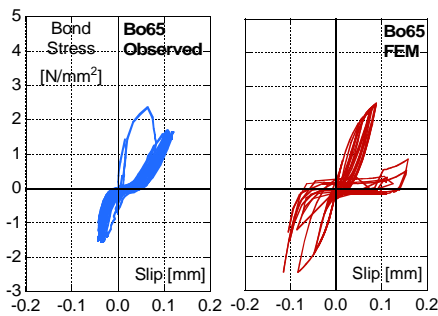
図3 解析モデル (2020年度試験体)

4. 研究成果

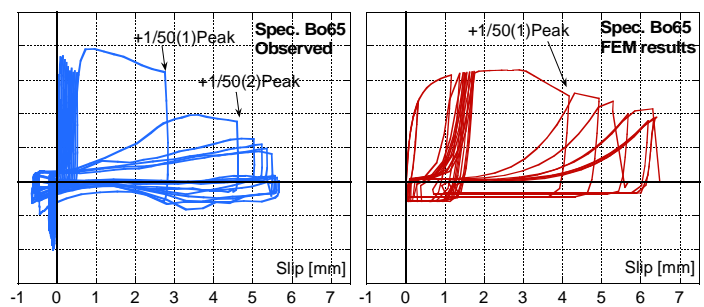
(1) 実験的検討：静的载荷実験における付着すべりの計測

2019年度の実験では、主に、直線定着部からの抜け出しが顕著に生じた。特に、上端側の主筋が抜け出した。スラブと反対側の主筋の計測を主目的として、スラブ位置を下側に配置したこと、かぶり厚が薄くなり定着性能が低下したことも要因と考えられるが、顕著なすべりとともに荷重低下し、スリップ挙動を示すことを確認した。計測結果の例を図4に示す。図には、後述するFEM解析結果も比較して示す。

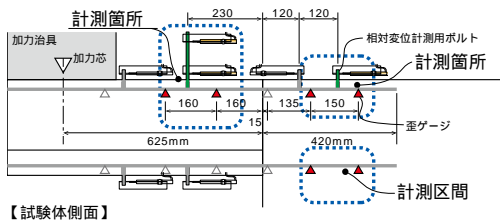
2020年度の実験では、部材内でのすべり計測を主たる目的として、付着割裂破壊に対する余裕度を小さくした。曲げ降伏には至ったものの、部材内の割裂ひび割れは顕著に現れ、すべりも計測された。実験結果の荷重変形関係を図5に、すべり量の計測結果を図6にそれぞれ示す。



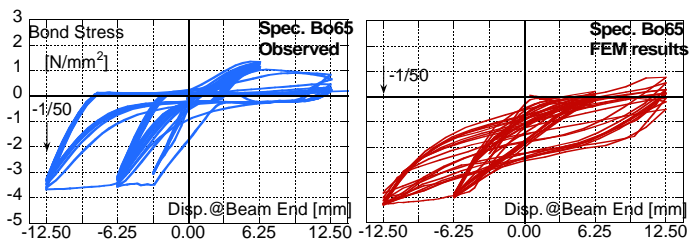
(a) 計測箇所 付着応力度～すべり量関係



(b) 計測箇所 付着応力度～すべり量関係



(c) 変位と歪度計測模式図



(d) 計測区間 付着応力度～全体変形関係

図4 付着応力度と変位量の関係の比較

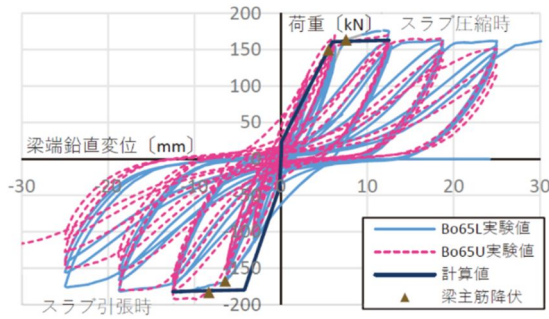


図5 荷重変形関係 (2020 年度)

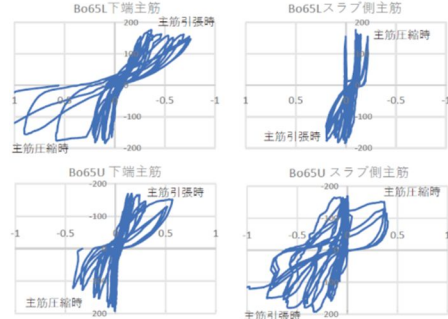
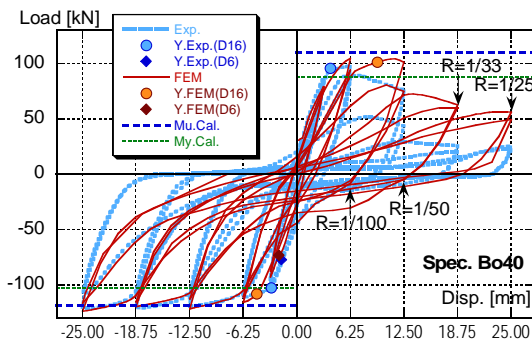


図6 すべり量の計測結果

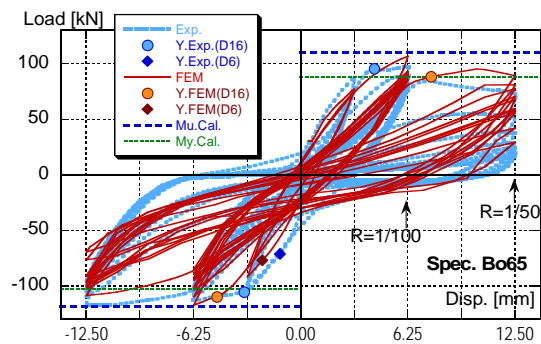
(2) 解析的検討：付着のモデル化手法の検証

非線形 FEM 解析は、2019 年度、2020 年度に実施したスラブ付き片持ち梁部材試験体に加えて、別の目的で実施した雑壁付き梁部材の静的載荷実験を対象として実施した。

2019 年度に実施した試験体の荷重変形関係の実験と解析の比較を図 7 に示す。抜け出しが生じた直線定着部の付着特性のモデル化方法を検証し、最終的に日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準^{文献 1)}を参照し、定着部の強度を定めることで、履歴復元力特性を再現できた。すべり量については、図 4 に示した通り、よく整合する結果を得ている。2020 年度の実験に対する解析結果を実験と比較して図 8 に示す。スパン内の付着割裂に対しては、日本建築学会の靱性指針^{文献 2)}を用いるのが最適な結果となった。

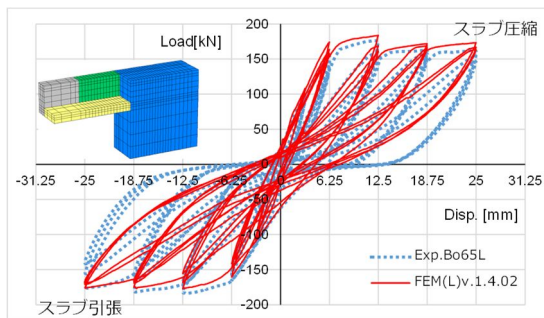


(a) 試験体 Bo40 (補強量・多)

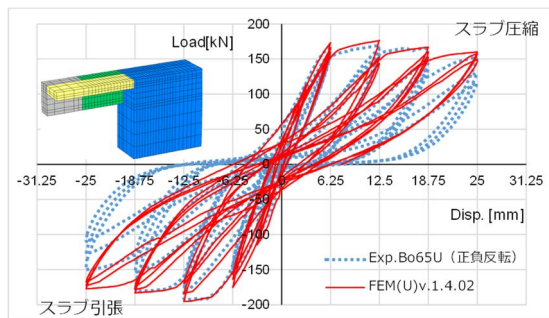


(b) 試験体 Bo65 (補強量・少)

図7 荷重変形関係の実験と解析の比較 (2019 年度実験)



(a) 試験体 Bo65L (スラブ下付き)



(b) 試験体 Bo65U (スラブ上付き)

図8 荷重変形関係の実験と解析の比較 (2020 年度実験)

雑壁 (腰壁や垂れ壁) の有無を変動因子とした梁部材実験^{文献 3)}を対象に、付着特性のモデル化手法を検証した。実験では、垂れ壁の有無や梁端の補強量を変動した梁部材を対象に静的載荷実験が行われ、破壊性状に変化が見られた。この実験に対して、配筋量や垂れ壁の有無を、付着特性のモデル化に反映した。すなわち、垂れ壁がつく側や、あばら筋が多い側の主筋は付着強度を強くし、相対的に垂れ壁がつかない側の付着性能が低くなるように設定している。

解析モデル図と、損傷状況の実験・解析比較を図 9 に、荷重変形関係の比較を図 10 に、主筋応力度分布の比較を図 11 にそれぞれ示す。解析結果は、実験結果とよく対応しており、このモデル化により、荷重変形関係や主筋の応力度分布を精度よく再現することができることが確認された。

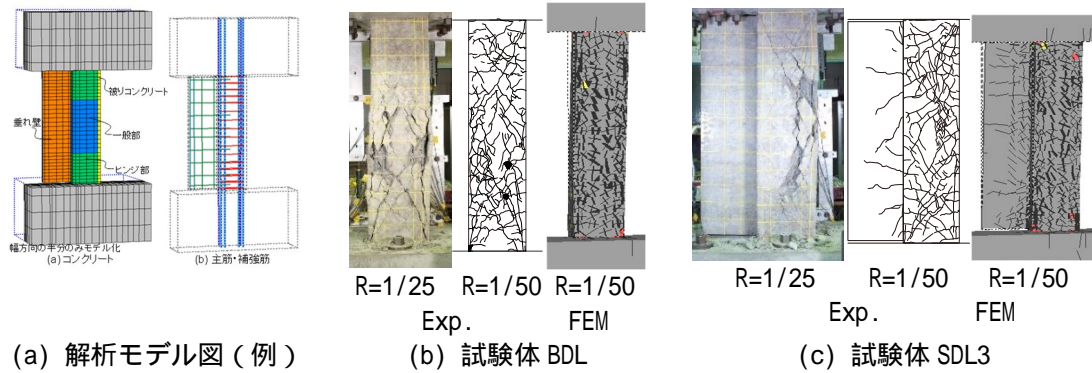


図 9 解析モデルと損傷状況の解析・実験比較

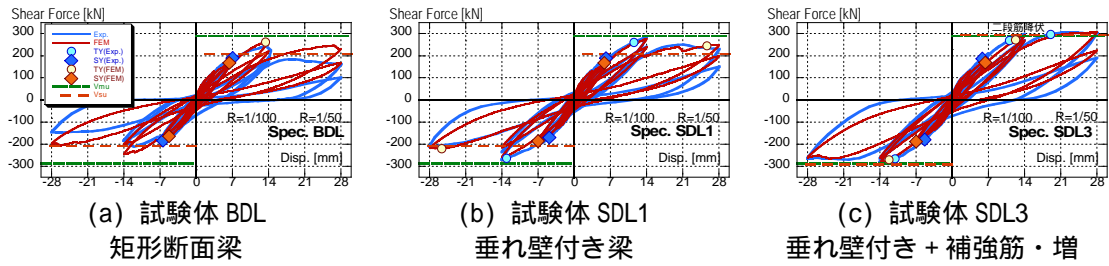


図 10 荷重変形関係の比較

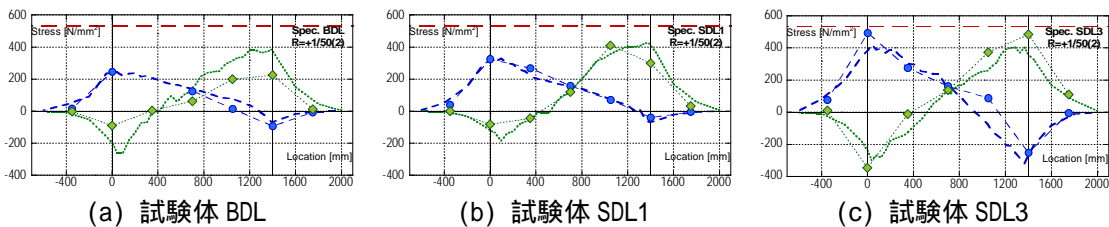


図 11 主筋応力度分布の比較 (R=1/50 時)

(3) 今後の課題と展望

主に梁部材を対象として実験を行い、主筋とコンクリート間の相対変位を計測する手法について検証した。また、実験結果を対象とした付着のモデル化については、ある程度試行錯誤も行ったが、再現精度を高めることができた。しかしながら、鉄筋コンクリート造建物を構成する部材はさまざまにあり、特に、柱梁交差部の挙動については未解明の点が残る。架構全体の挙動に対する付着やすべりの影響を考慮できるように、本研究で得られた成果を拡張し、適用範囲を拡大していくための検証を進めていく必要があると考えられる。

< 引用文献 >

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 3) 田中敦也・芥捷・浦祐太郎・杉本訓祥・田才晃：構造スリットを有する腰壁・垂れ壁付き RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究 (その 1，その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.163-166，2020 年

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 布施虎太郎・胡全斌・杉本訓祥・田才晃	4. 巻 構造
2. 論文標題 鉄筋コンクリート造スラブ付き片持ち梁部材の繰り返し載荷実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 51-52
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 杉本訓祥・胡全斌・布施虎太郎・田才晃	4. 巻 Vol.43, No.2
2. 論文標題 主筋を直線定着したスラブ付きRC梁の復元力特性と付着挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 331-336
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 有
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 杉本訓祥・田中敦也・赤津颯一・田才晃	4. 巻 Vol.44, No.2
2. 論文標題 構造スリットを有する垂れ壁付きRC梁部材の非線形FEM解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 有
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 茂木友寛・胡全斌・小山遥加・田才晃・杉本訓祥	4. 巻 構造
2. 論文標題 鉄筋とコンクリート間の付着挙動と鉄筋コンクリート部材の復元力特性の関係に関する実験的研究（その1：実験計画および実験結果（復元力特性と主筋の応力度））	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 157-158
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 胡全斌・茂木友寛・小山遥加・田才晃・杉本訓祥	4. 巻 構造
2. 論文標題 鉄筋とコンクリート間の付着挙動と鉄筋コンクリート部材の復元力特性の関係に関する実験的研究(その2: 実験結果(付着応力度と主筋のすべり量))	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 159-160
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4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 布施虎太郎
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造スラブ付き片持ち梁部材の繰り返し載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本訓祥
2. 発表標題 主筋を直線定着したスラブ付きRC梁の復元力特性と付着挙動
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本訓祥
2. 発表標題 構造スリットを有する垂れ壁付きRC梁部材の非線形FEM解析
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茂木友寛, 胡全斌
2. 発表標題 鉄筋とコンクリート間の付着挙動と鉄筋コンクリート部材の復元力特性の関係に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	田才 晃 (Tasai Akira) (40155057)	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・名誉教授 (12701)	

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