

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02226

研究課題名（和文）微視 - 構造連成破壊力学に基づく劣化したコンクリート部材のせん断抵抗機構の解明

研究課題名（英文）Clarification on Shear Resisting Mechanics of Damaged Concrete Members Based on Micro-Structural Interactive Fracture Mechanics

研究代表者

三木 朋広 (MIKI, Tomohiro)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30401540

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、アルカリシリカ反応(ASR)によって劣化したコンクリート部材のせん断抵抗機構を解明するため各種検討を行った。要素検討では、水の存在が、繰返し荷重下におけるASRによるひび割れの進展に与える影響を調べるため、劣化度を非破壊試験結果に基づき定量化したのち、水中圧縮疲労試験を実施し、低サイクル圧縮挙動、特に繰返し載荷中の圧縮ひずみの増加プロセスを実験的に捉えることに成功した。また、異なるせん断スパン有効高さ比 a/d のRCはりを対象とし、斜めひび割れの発生荷重、ひび割れの角度や分散性の違いにより、 a/d が異なるASR供試体のせん断耐力に与える影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ASRによる劣化は「水」の影響を受けるため、同一構造物であっても桁端部や橋脚上部など、水の影響の多寡により損傷状態が異なる。また、ASRが生じたコンクリート部材では、コンクリート内在の損傷が空間的に分布するため、部材から採取したコアの力学特性と構造部材の特性を直接関連づけることができない課題がある。本研究の成果により、劣化状態の空間分布やばらつきを考慮して、内在損傷が外力によって生じるひび割れ進展自体や、部材の終局時に見られる破壊の局所化現象に及ぼす影響が明らかとなった。今後、部位の損傷状態やその程度に従って必要な箇所に絞って補強するといった、適切な補強対策が可能となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study presents various investigations to clarify the shear resistance mechanism of concrete members deteriorated by alkali-silica reaction (ASR). In the elemental experiments, the effect of water on the crack propagation in the concrete damaged due to ASR under cyclic compressive loading was investigated. First, the degree of deterioration was quantified based on non-destructive tests, and compression fatigue tests of the concrete with various damaged levels in water-submerged conditions was performed. From the experiments, we particularly succeeded in experimentally capturing the increasing process of compressive strain during compressive cyclic loading in the submerged condition. In addition, the loading tests for the RC beams with different shear span effective height (a/d) ratios revealed that the effect of the diagonal cracking load, the angle and distribution of the diagonal cracks on the shear strength of the ASR-damaged RC beams with different a/d ratios was clarified.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：微視 - 構造連成破壊力学、アルカリシリカ反応(ASR)、水中圧縮疲労、ひび割れ密度、せん断スパン有効高さ比 a/d 、RCディープビーム、圧縮破壊エネルギー、ケミカルプレストレス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の劣化の一つであるアルカリシリカ反応(以下, ASR)は, その劣化進行が周辺環境から侵入する「水」の影響を受けるため, 同一の構造物であっても橋桁の端部や橋脚の上部など, 水かかりの有無, 水の影響の多寡により部位毎に損傷状態が異なる。そのため, 実務では, 各部位の損傷状態やその程度に従って, 必要な箇所に絞って補強するといったメリハリの利いた対策が求められる。

従来, 著しく劣化した構造部材の性能は, 構造物の損傷状態に基づく経験的な方法や, 構造物の損傷状態を再現した縮小模型の破壊実験によって評価されてきた。しかし, この様な方法によって, 実際に見られる多様な損傷状態や部位毎で異なる損傷状態に対応するには限界があり, 材料の「ありのままの劣化状態」を考慮できる性能評価手法が必要となる。

コンクリート構造の性能を評価するにあたり, エネルギー吸収が小さく, 急激に進行するせん断破壊は, 設計上避けるべき終局状態であり, ASR によって劣化したコンクリート部材においてもせん断抵抗機構を解明することが重要である。ASR が生じた部材では, コンクリートの内在損傷が空間的に分布した状態であり, 部材から取り出したコアの材料力学特性と構造部材の特性を直接関連づけることができないことが課題である。そのため, 劣化したコンクリート部材のせん断抵抗機構を調べるためには, 空間的に分布する ASR による内在損傷が, 外力によるひび割れ進展自体や, 部材の終局時に見られる破壊の局所化現象に及ぼす影響について明らかとする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では, 劣化したコンクリート部材のせん断抵抗機構について, 空間的に分布する ASR による内在損傷が, 外力によるひび割れ進展自体や, 部材の終局時に見られる破壊の局所化現象に及ぼす影響を調べることを目的とする。そこで, 構造部材そのものとコアの力学特性が異なる要因として, 部材中では ASR の膨張に伴う変形が周辺のコンクリートや内在する鉄筋によって拘束されるが, コアとして取り出すとその拘束を解放してコンクリートの状態が変化するため, 構造物から採取したサンプルをもとに評価できない課題がある。しかし, 実際の構造物を直接対象とした載荷試験の実施は難しく, コアの力学特性に基づいて構造物の性能評価を行うことが現実的という制約から, 本研究では, 構造部材内のコンクリートの損傷状態を再現し, それとコアの力学特性の関係を明らかにする。その損傷状態を忠実に反映した材料モデルを用いて, 劣化したコンクリート部材のせん断抵抗機構を解明することを目指した。

具体的には, コンクリート部材の構造性能において特に重要な「せん断力に対する抵抗」に着目し, そのメカニズムを解明するために, 以下の3つの目的を設定した。

目的1: ASR によるひび割れの3次元可視化の結果に基づく, 構造部材内のコンクリートの損傷状態を反映できる応力-ひずみ関係等の材料破壊のモデル化(微視的破壊力学)

目的2: ASR が生じた部材で空間的に分布するコンクリートの内在損傷がひび割れ進展に与える影響, 部材強度の寸法効果に与える破壊局所化領域の影響の定量化(構造的破壊力学)

目的3: 目的1と目的2の成果を力学的に関連づけた「微視-構造連成破壊力学」の提案, それに基づく劣化したコンクリート部材のせん断抵抗機構の解明とその実証

3. 研究の方法

3. 1 水中繰返し圧縮試験

本研究では, ASR の反応性を有する骨材を用いたコンクリートを用いた円柱供試体(直径100 mm, 高さ200 mm)18体を載荷試験の対象とした。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し, 混和剤には AE 減水剤を使用した。粗骨材の最大寸法は20 mmとした。ASR 劣化を再現するため, 細骨材, 粗骨材ともに, 反応性を有する骨材を, 反応性を示さない非反応性骨材と体積比1:1で混合して使用した。なお, ASR を促進するために, 所定量の NaCl を練混ぜ時に添加した。また, 準備した ASR 促進供試体は, それぞれ材齢3ヵ月(0.25年)の供試体が6体, 材齢約3年6ヵ月の供試体が6体, 材齢約7年の供試体が6体である。各供試体は材齢シリーズ毎で異なるバッチで作製した。1日材齢で脱型し, 28日間水中養生した後, 所定の材齢まで屋外暴露した。

使用する供試体は, D シリーズとして, 試験前に24時間, 屋内に移して乾燥させた状態の後, 気中で載荷試験を行った。W シリーズの供試体は, 載荷試験前に24時間水に浸けて

おき、水槽を用いて水中で圧縮載荷試験を行った。Wシリーズの載荷の様子を図1に示す。

載荷試験には2000 kN 万能載荷試験機を用いて、載荷速度は10 kN/sec で試験を行った。供試体の圧縮ひずみ度は、供試体対角に2個の変位計を設置し、圧縮変形を供試体全長で除した値の平均値により求めた。載荷試験では、最初に比較的低い応力レベルの荷重として、設定した圧縮強度30 N/mm² に対する応力比25%~40%の荷重で100回繰返し載荷を行い、一度除荷した後、応力レベルを上げて応力比40%~70%の荷重で200回繰返し載荷を行った。

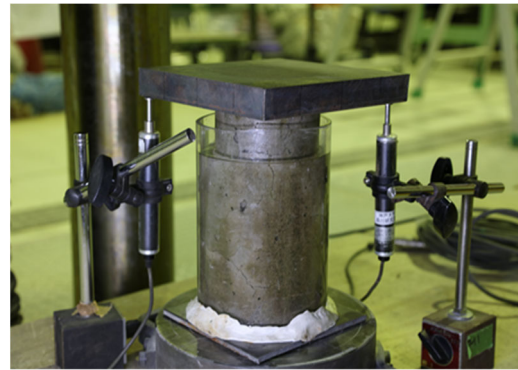


図1 水中圧縮疲労試験の様子

3. 2 ASR劣化したコンクリートの破壊力学特性に関する鋼材拘束の影響

ASRによる膨張量を混和材の種類と使用量にて変化させた3種類のモルタル供試体を使用した。細骨材としては化学法(JISA 1145)により無害でないと判定された反応性骨材(安山岩砕砂)を用意した。セメントには普通ポルトランドセメントを、混和材にはフライアッシュならびに高炉スラグ微粉末を用意し、セメントと混和材を合わせて結合材とした。混和材は結合材に対して質量比で内割置換とし、混和材を使用せずセメントのみを結合材に用いた配合、フライアッシュをセメントに対して15%置換した配合、高炉スラグ微粉末をセメントに対して45%置換した配合をそれぞれ用意した。また、反応性骨材の粒度が膨張量に与える影響を検討した既往の研究(2)を参考に、反応性骨材の粒径を0.15-0.30 mmの範囲にすることでASRによる膨張量が最大となるように粒度を調整した。

切欠きはりの曲げ試験は、JCI-S-001-2003を参考に実施した。供試体の概要を図2、試験時の様子を図3に示す。試験では拘束の有無が異なる寸法40×40×160 mmの供試体を用いて、ひび割れ発生強度ならびに破壊エネルギーを測定した。供試体の切欠きはディスクグラインダを用いて載荷直前に導入した。拘束がある供試体は、供試体断面中央にφ3 mmのねじ切り加工済のステンレス鋼棒を、供試体端部に厚さ2 mmのステンレス板をそれぞれ設置した。ひび割れ発生強度は、切欠きはりの曲げ試験中の切欠き先端をマイクログラフにより観察し、ひび割れを確認した時点の荷重から算出した。

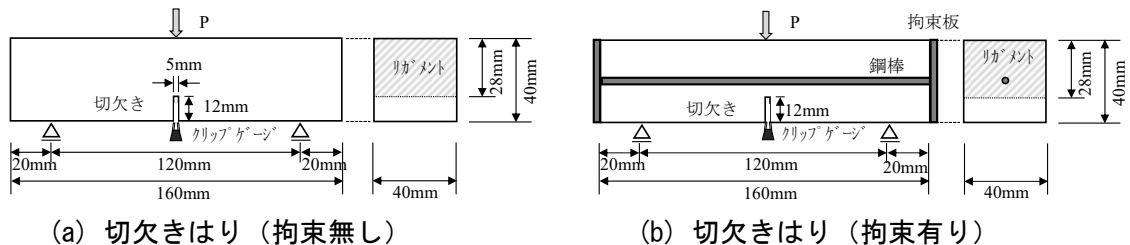


図2 切欠きはりの寸法と載荷条件

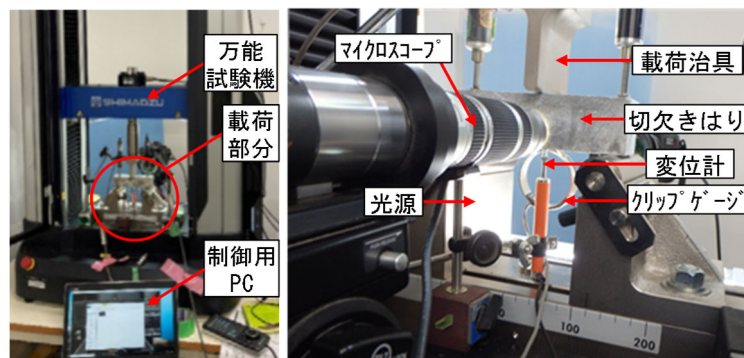


図3 切欠きはりの曲げ試験の様子

3. 3 ASR劣化が生じたRC部材の載荷実験

載荷試験では、2000kN 万能試験機を用いて4点曲げ載荷を行った。載荷速度は約0.2 kN/secとした。測定項目は荷重、鉄筋ひずみ、載荷点および支点の変位、ひび割れの開口変位とした。載荷試験中は、ひび割れの目視観察を行うとともに、各荷重レベルで供試体側面をデジ

タルカメラにより撮影し、画像解析によってコンクリートのひずみ分布を算出した。引張鉄筋は、RCはり端部で定着板とナットを用いて固定し、鉄筋の定着部におけるすべりを防止した。鉄筋に貼り付けたひずみゲージはデータロガーに接続し、一定間隔で鉄筋ひずみを記録した。また、ASR 供試体においては引張鉄筋に沿って発生した ASR ひび割れの一部において亀裂変位計を設置して、ひび割れの開口変位を測定した。

4. 研究成果

4. 1 ASR が生じたコンクリートの水中低サイクル圧縮疲労特性

ASR 劣化したコンクリートについて水の存在が、コンクリートの低サイクル圧縮疲労挙動に与える影響を実験的に調べた。供試体に生じたひび割れの様子を図 4 に示す。一連の試験によって、材齢 7 年の ASR 劣化したコンクリートの繰返し荷重下における圧縮挙動に対して水が影響することがわかった。そのメカニズムとして、微細ひび割れ中の水の存在によって、ひび割れの先端に局所的な引張応力が発生し、载荷に伴ってひび割れが進展することが推察された。また、異なる材齢の ASR 劣化したコンクリートにおいて、供試体表面のひび割れではなく、超音波試験から予測される内部ひび割れの程度が、繰返し挙動に与える水の影響が大きいことが示唆された (図 5)。

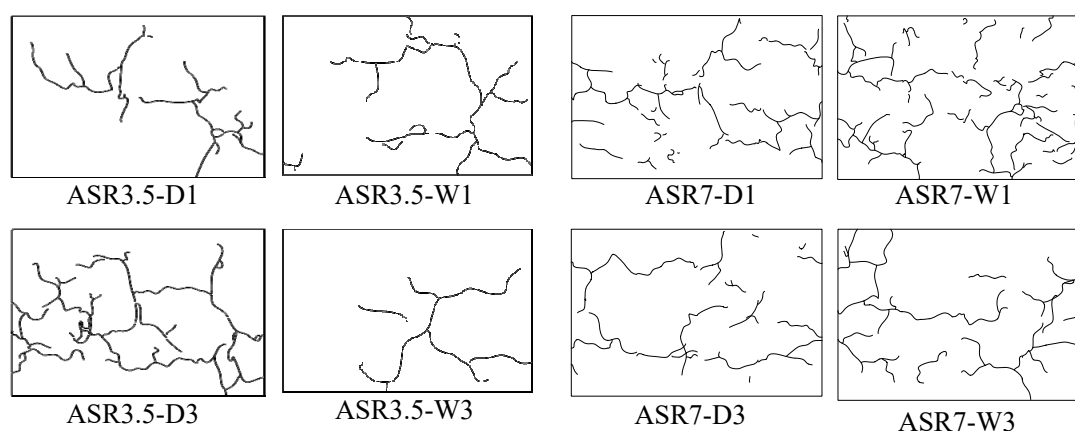


図 4 ひび割れ図 (円柱供試体側面展開)

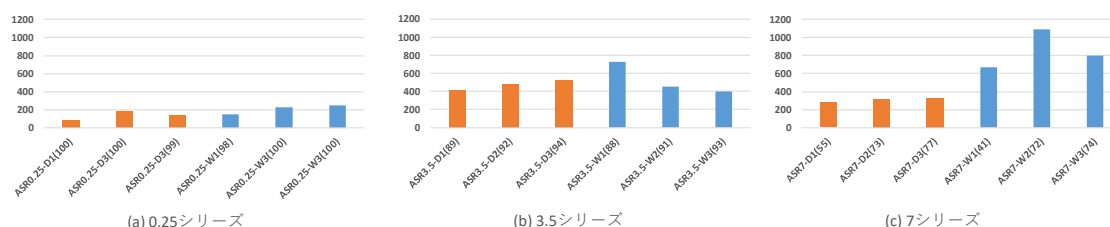


図 5 材齢シリーズの増分ひずみ

4. 2 圧縮応力下における ASR 劣化したコンクリートのポストピーク挙動

拘束下における ASR および DEF の膨張挙動を把握するため、側方向を拘束した円柱供試体の膨張試験を行い、ASR と DEF はどちらも拘束により異方的な膨張を示すこと、DEF では ASR と比較して拘束により膨張がより大きく抑制される傾向を確認した。また、ASR 劣化したコンクリートのポストピーク挙動について実験的に検討をした。膨張が 1000~3000 μ 程度の無拘束のコンクリートの圧縮破壊試験をした結果、劣化に伴い弾性係数は大幅に低下するものの、圧縮強度や圧縮破壊エネルギーは大きく低下しないことを明らかにした。また、画像解析を用いて圧縮破壊における局所化挙動を明らかにした。

4. 3 ASR 劣化したコンクリートの破壊力学特性に関する鋼材拘束の影響

拘束を受けたモルタルがアルカリ骨材反応 (ASR) によって膨張した場合の力学特性を評価することを目的に、50°C飽和 NaCl 水溶液に浸漬させたモルタルに対して、膨張量の測定、圧縮強度試験および切欠きはりの曲げ試験を実施した。その結果、ASR により約 17000×10^{-6} の膨張ひずみが生じた供試体は膨張前と比較して圧縮強度が 59%低下することがわかった。一方、ASR による膨張を鋼棒ならびに両端板が拘束した供試体のひび割れ発生強度は 140%増加し、拘束の無い条件で ASR が生じた供試体の破壊エネルギーは 23%増加した。

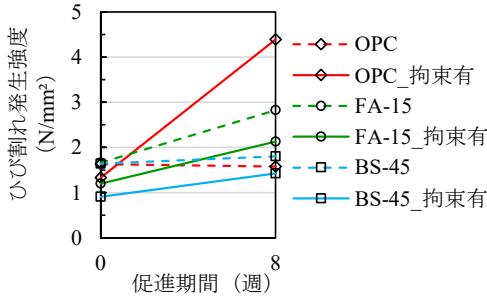


図6 ひび割れ発生強度と促進期間の関係

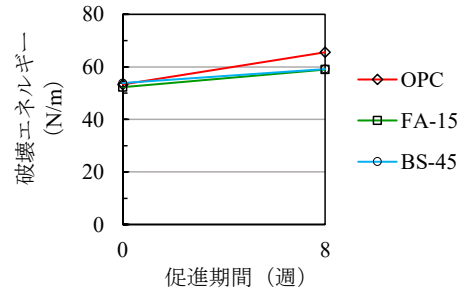


図7 破壊エネルギーと促進期間の関係

4.4 せん断スパン有効高さ比が異なるRCはりのせん断耐荷機構

ASRが生じたRCはりのせん断耐荷機構を明らかにするため、実験的に詳細に調べた。実験ではせん断スパン有効高さ比 $a/d = 1.0$ (ディープビーム), 2.5 (ショートビーム), 4.5 (スレンダービーム) の3種類のRCはりを対象とした。せん断載荷試験では、ASRによる主鉄筋に沿ったひび割れの開口変位、鉄筋ひずみ、ならびに画像解析によって斜めひび割れの進展挙動を計測した。一連の実験によって、斜めひび割れの発生荷重 (図8), ひび割れの角度や分散性の違い (図9) により、 a/d が異なるASR供試体のせん断耐力に与える影響を明らかにした。

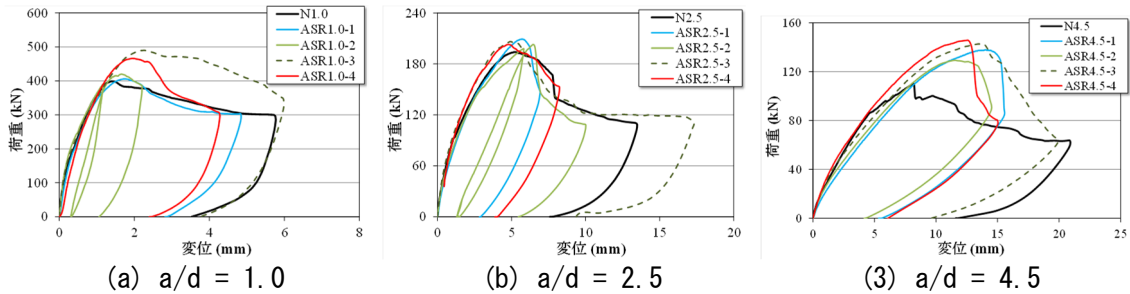


図8 荷重-変位関係

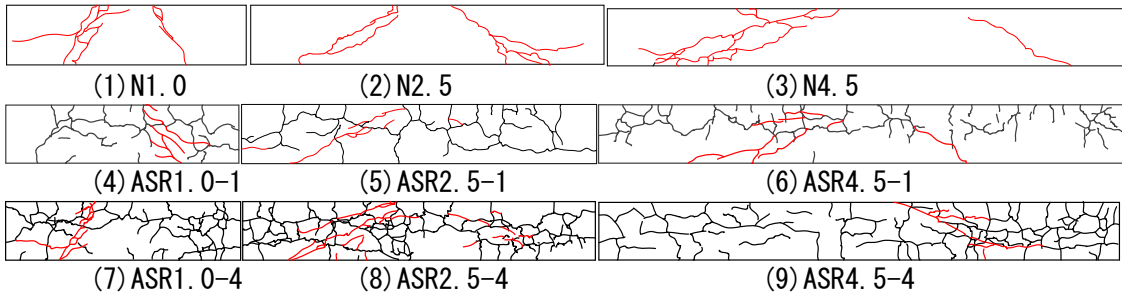


図9 ASRによって生じたひび割れ(黒線)と載荷試験後の斜めひび割れ(赤線)の性状

4.5 ASR膨張量のばらつきがRCディープビームのせん断圧縮耐力に与える影響

複数体のせん断圧縮破壊するRCはりを対象として、同一条件でASRを生じさせた場合の膨張挙動と膨張後のせん断耐力について実験的に検討した。膨張挙動については、図10に一例を示すが、膨張量の平均は 2020×10^{-6} 、変動係数は35.4%となり、測定結果にばらつきが見られたのに対して、RCはりのせん断圧縮耐力については、平均値158kN、変動係数5.99%と結果のばらつきが小さいことが確認された。

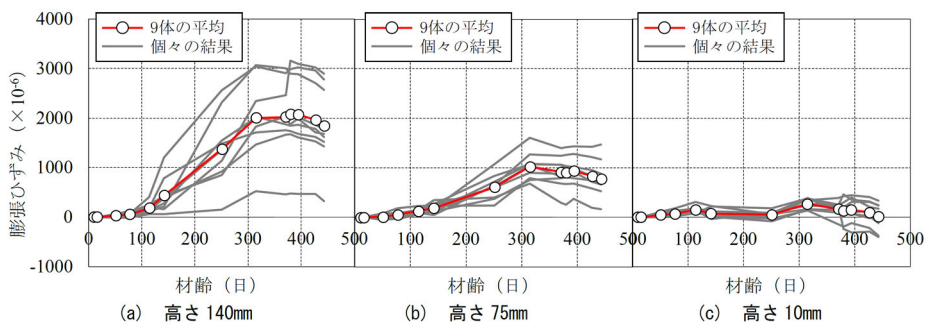


図-8 水平方向の膨張ひずみ (RCはり)

図10 RCはりの各高さ位置における水平方向の膨張ひずみ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 三木朋広, 荒川智大	4. 巻 43(2)
2. 論文標題 アルカリシリカ反応によるコンクリートの損傷がRCはりのせん断耐荷機構に与える影響に関する基礎的研究	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 397-402
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 三木朋広, 西川泰正	4. 巻 42(2)
2. 論文標題 水中繰返し圧縮試験によるASRが生じたコンクリートの低サイクル圧縮疲労特性に関する研究	5. 発行年 2020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 103-108
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 三木朋広, 笹脇壮太	4. 巻 62
2. 論文標題 機械学習によるコンクリート橋点検写真のひび割れ分類における要因分析と効率化に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 建設工学研究所論文報告集	6. 最初と最後の頁 15-24
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 西川泰正, 三木朋広	4. 巻 19
2. 論文標題 水中圧縮疲労試験によるアルカリシリカ反応が生じたコンクリートの力学特性の把握	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 43-46
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 Miki, T., Arakawa, T. and Koshiba, Y.	4. 巻 10(B)
2. 論文標題 Shear Carrying Capacity of Reinforced Concrete Beams with Various a/d Ratios damaged due to the Alkali-Silica Reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures	6. 最初と最後の頁 1-9
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 田中敦士, 三木朋広	4. 巻 41(2)
2. 論文標題 軸方向鉄筋が腐食したRCディープビームのせん断耐荷機構に関する実験的研究	5. 発行年 2019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 667-672
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Rabotovao, A.M, Miki, T
2. 発表標題 Influence of Bond Property Between CFRP Bars and Concrete on Overall Behavior of Circular RC Beams Strengthened by CFRP Under Shear
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野峻平, 三木朋広
2. 発表標題 RCディープビームとRCショートビームのせん断強度の寸法効果に関する基礎研究
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笹脇壮太, 三木朋広
2. 発表標題 機械学習によるコンクリート橋点検写真の分類の効率化に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中敦士, 三木朋広
2. 発表標題 軸方向鉄筋が腐食したRCディープビームのせん断耐力に関する研究,
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本広海, 上田尚史
2. 発表標題 拘束下におけるASRおよびDEFの膨張の異方性の評価
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会 2019年6月 土木学会関西支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ueda, N. and Iwamoto, H.
2. 発表標題 Anisotropic Expansion of Concrete due to Internal Swelling Reactions under Cylindrical Restraint
3. 学会等名 The 14th international Symposium in Science and Technology, Chulalongkorn University, 7-9 August 2019
4. 発表年 2019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	上田 尚史 (UEDA Naoshi) (20422785)	関西大学・環境都市工学部・准教授 (34416)	

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