

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04221

研究課題名(和文)材料劣化の空間的ばらつきを考慮した構造性能評価手法の構築

研究課題名(英文)Development of loading capacity evaluation method considering dispersion of material deterioration

研究代表者

三方 康弘(Mikata, Yasuhiro)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：60434784

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)：本研究では、ASR劣化がRCはり部材の耐荷特性に及ぼす影響を把握することを目的として、ASR膨張の経過観察及び載荷試験を実施した。また、製作した全てのRCはり供試体から採取したコンクリートコアにX線CT撮影を行い、コンクリート内部のひび割れ状況を把握した。さらに、拘束供試体を製作し、拘束の方向性がASRによる体積膨張ひずみに及ぼす影響について検討した。これらの結果から、材料劣化の空間的ばらつきに及ぼす要因である鉄筋などの拘束効果の影響について把握した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料劣化を生じたコンクリートの分析にX線CT撮影を用いた事例はほとんど無いことから、本研究の計測手法は今後の研究に対して有用な知見を得た。さらに、本研究の成果はASR劣化だけでなく、様々な材料劣化のばらつきを有するコンクリート構造物評価の適用への可能性があり、コンクリート構造物の維持管理の高度化が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, ASR expansion was observed and loading tests were conducted to understand the effect of ASR degradation on the load-capacity of RC beam members. In addition, X-ray computed tomography (CT) images were taken of concrete cores sampled from RC beam specimens to determine the cracks in the concrete. Furthermore, restrained specimens were fabricated, and the effect of the directionality of the restraint on the volumetric expansion strain due to ASR was examined. From these results, the influence of restraint effects, such as steel bars, on the spatial variation of material degradation was determined.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ASR 材料劣化 X線CT 耐力評価 拘束効果

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

橋梁をはじめとするコンクリート構造物において、アルカリシリカ反応(以下、ASR と表記)による劣化事例¹⁾が多数報されており、補修・補強を含めた早急な対策が求められているが、部材形状・寸法・配筋などの構造条件や、温度・湿度・水分供給などの環境条件が複合的に影響を及ぼすことから、構造物の劣化程度や性状は様でないため、ASR 劣化したコンクリート構造物の耐荷特性やひび割れ性状を的確に把握し、構造物の安全性を定量的に評価する技術確立する必要がある。一般に、ASR 劣化は、コンクリートにひび割れを生じさせるほか、コンクリートの圧縮強度や弾性係数を低下させ、構造物の耐荷性能に影響を及ぼしている。また、RC はり部材における ASR 劣化として、軸方向鉄筋や PC 鋼材に沿った方向性のあるひび割れが多く見られ、既往の研究²⁾から、かぶりコンクリート(鉄筋より外側のコンクリート)とコアコンクリート(鉄筋より内側のコンクリート)ではひび割れの発生状況が異なることが報告されている。

2. 研究の目的

本研究では、ASR 劣化が RC はり部材の耐荷特性に及ぼす影響を把握することを目的として、ASR 膨張の経過観察及び載荷試験を実施した。なお、作製した全ての RC はり供試体から採取したコンクリートコアに X 線 CT 撮影を行い、コンクリート内部のひび割れ状況を把握することとした。さらに、拘束供試体を製作し、拘束の方向性が ASR による体積膨張ひずみに及ぼす影響について検討した。

3. 研究の方法

令和3年度、令和4年度

3.1 供試体概要

はり供試体は図.1 に示すように、幅 100mm × 高さ 200mm の長方形断面を有する全長 1800mm の RC 単純はり部材を使用した。主鉄筋には 2-D16 ($f_{sy}=389.2\text{N/mm}^2$) を有効高さ $d=170\text{mm}$ で配置し、せん断補強筋には D6 ($f_{sy}=456.4\text{N/mm}^2$) を使用し、配置間隔は $s=140\text{mm}$ とした。また、比較のために図.2 に示すようなせん断補強筋を配置しない供試体も作製した。

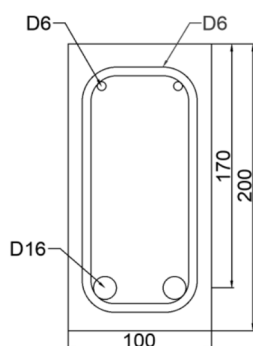


図.1 はり供試体の側面図・断面図

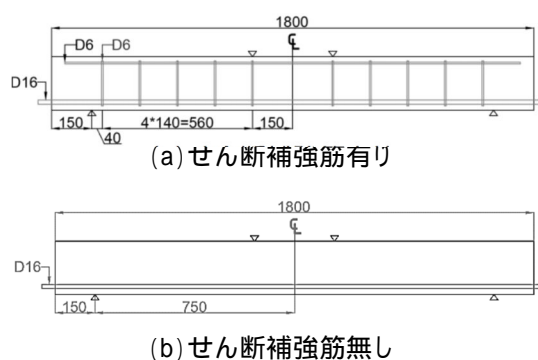


図.2 はり供試体の側面図

3.2 載荷試験方法

令和4年度、令和5年度

載荷方法は、曲げスパン 300mm、せん断スパン 560mm、 $a/d=3.29$ とした対称 2 点集中荷重方式を採用した。なお、普通コンクリートと ASR コンクリートの材齢 28 日と載荷試験前(普通コンクリート材齢 367 日、ASR コンクリート材齢 389 日)の物理的性質を表.1 に示す。

表.1 コンクリートの強度特性

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)		弾性係数 (kN/mm^2)		載荷試験時の 材齢 (日)
	材齢 28日	載荷 試験時	材齢 28日	載荷 試験時	
普通	29.5	44.0	24.6	34.4	367
ASR	37.2	30.0	26.2	13.4	389

3.3 X 線 CT 撮影

荷重によるひび割れと ASR 劣化コンクリート内部のひび割れ進展状況との関係性を明らかにするため、載荷試験と CT 撮影を実施する供試体と CT 撮影のみを実施する供試体を作製した。各供試体の詳細を表.2 に示す。各はり供試体から直径 100mm、高さ 100mm のコアを供試体側面から軸直角方向に採取し、X 線 CT 撮影を実施し、コンクリート内部のひび割れ状況把握を試みた。なお、X 線 CT の撮影条件は、X 線管電圧 150kV、X 線管電流 200 μA 、ピクセルサイズ 0.127mm、撮影画像の画素数は 1856 × 1472pixels である。

表2 はり供試体の詳細

供試体	劣化の種類	せん断補強筋の有無	載荷試験の実施	X線CT撮影
N-1	Normal	×	○	○
N-2		○		
A-1	ASR	×	○	
A-2		×	×	
A-3		○	○	
A-4		○	×	

3.4 拘束検討供試体

直径75mm,高さ150mmの型枠3本を使用した。事前に,2本の型枠では,計測時に図.3のように長さ変化率の測定で使用するアルミ製ボルトを上下端面に治具を用いて設置していた。ボルト形状は,先端を球面に加工した直径6mm,長さ35mmである。また残り1本の型枠では,外径12mm,厚さ2mmのシリコンゴムホースを断面中心に設置していた。これらの型枠に,プラネタリ縦型ミキサで練り混ぜたモルタルを打ち込んだ。なお,練混ぜ直後のモルタルの性状は,JIS R 5201 に準じたモルタルフローは183.5mm,質量法により計測した空気量は1.4%であった。打込み翌日に脱型し,シリコンゴムホースも取り出した。その後,供試体を20℃の恒温水槽で28日間養生した。

養生終了後,側面拘束する供試体の側面を,図.4のように2つの厚さ5mmで曲面形状のアルミ拘束治具で覆い,圧力が生じないように4カ所の突起部でネジ止めた。なお,供試体とアルミ拘束具との間にテフロンシート2枚を挟んだ。縦拘束する供試体では,図.5のように上下面に設置した直径80mm,厚さ6および15mmの円板と供試体中心軸に直径6mmのアルミ丸棒を通し,アルミ丸棒に緊張が生じないようにナットで固定した。

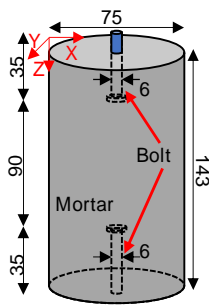


図.3 無拘束

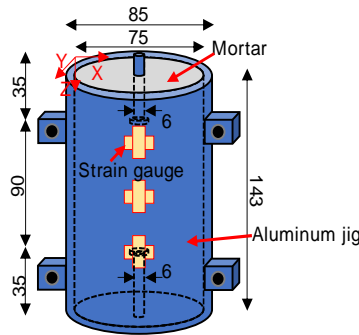


図.4 側面拘束

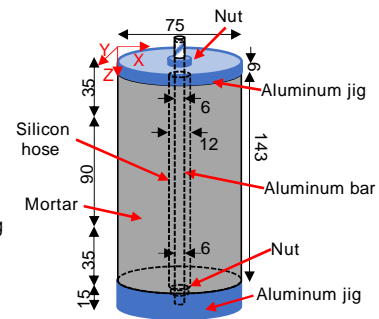


図.5 縦拘束

4. 研究成果

4.1 破壊形式と最大荷重

各はり供試体の載荷試験後のひび割れ状況を図6に示す。耐力計算結果と最大荷重および破壊形式等の載荷試験結果を表3に示す。耐力計算においては表1に示した載荷試験時点のテストピースの実材料強度を用いて,ファイバー法により曲げ破壊荷重,土木学会のせん断耐力式によりせん断破壊荷重を算定した。なお,本研究においてケミカルプレストレスについては考慮していない。

せん断補強筋を配置していないA-1供試体は,主鉄筋位置に生じていたASRひび割れにせん断ひび割れがつながり,ASRひび割れが開口することにより,せん断引張破壊に至った。一方,N-1供試体はA-1供試体と比較して,40kNを超えてから急激に斜めひび割れが進展し,斜め引張破壊に至った。また,A-3供試体は,曲げひび割れとつながっている箇所もあるが,ASRひび割れはあまり開口せず,N-2供試体と同様に鉄筋降伏後に曲げ圧縮域が圧壊する曲げ引張破壊を呈した。

計算値と実験値を比較すると,いずれの

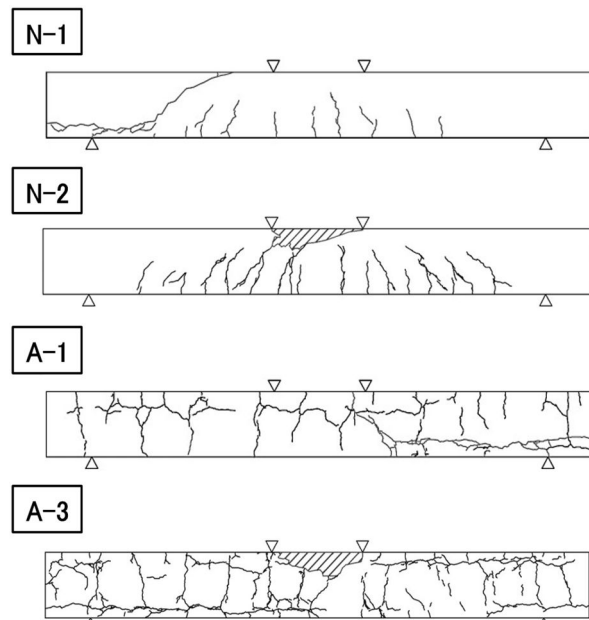


図.6 載荷試験後のひび割れ状況

表.3 荷重試験結果

供試体	最大荷重 P _u (kN)	曲げ破壊 荷重 (計算値) P _{ub} (kN)	せん断破壊 荷重 (計算値) P _{us} (kN)	*4 破壊形式
N-1	58.4	80.8	49.3	斜め引張
N-2	82.6	80.8	113.2	曲げ引張
A-1	49.6	75.7	43.4	せん断引張
A-3	82.4	75.7	107.3	曲げ引張

供試体も最大荷重の実測値は計算値を上回っており、計算値は安全側の値を示していると言える。

これらの結果から、ASR劣化を生じたせん断補強筋を配置しなかった供試体において、主鉄筋位置に生じていたASRひび割れが荷重によりさらに開口し、割裂ひび割れが発生した後、せん断引張破壊に至り、普通コンクリート供試体とは破壊形式が異なった。

4.2 荷重 - 中央変位関係

図.7に荷重と中央変位の関係を示す。なお、N-1供試体は、たわみの計測に不備があったため除外している。A-1、A-3、N-2供試体の初期剛性は、同じであった。せん断補強筋を配置していないA-1供試体は、40kNにおいて斜めひび割れが急激に進展し、A-3供試体と比較して同一荷重時の変形が大きくなった。最大荷重に達した後、変位が増加するにつれて荷重が著しく低下した。一方で、せん断補強筋を配置したN-2、A-3供試体では、荷重が約74kNに達するまで中央変位は安定的な増加傾向を示し、最大荷重時の中央変位は、N-2供試体が11.02mm、A-3供試体が12.07mmであり、数値に大きな差異はなかった。また、最大荷重に達した後、変位が増加するにつれて荷重が比較的緩やかな軟化挙動を示し、最終的に典型的な曲げ引張破壊に至った。このことから、両供試体で鉄筋降伏後（約74kN）に延性的な挙動を見せ、最大荷重に達した後、圧縮縁のコンクリートが徐々に圧壊したことが解る。

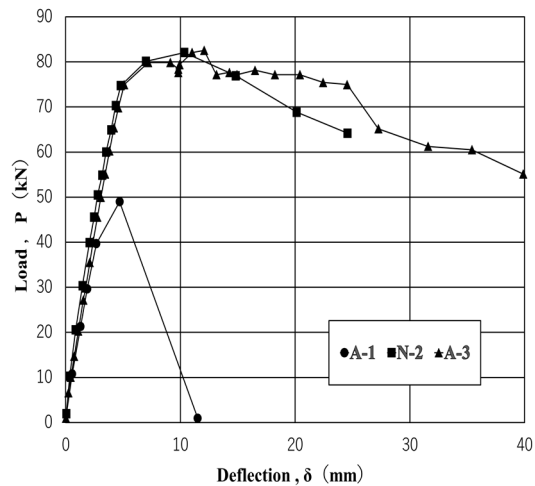


図.7 荷重 - たわみ関係

4.3 X線CT撮影

各はり供試体から直径100mm、高さ100mmのコアを供試体側面から軸直角方向に採取し、X線CT撮影を実施し、コンクリート内部のひび割れ状況把握を試みた。

(1) せん断補強筋を配置しない場合

せん断補強筋を配置していないN-1、A-1供試体コアはいずれも荷重により斜めひび割れが発生した箇所から採取した。CT画像より、A-1供試体は、N-1供試体と比較して微細なひび割れが多く確認され、特にA-1供試体のかぶりコンクリート部分と中央部に共通して、骨材同士を結ぶように微細なひび割れが確認された。これは荷重の影響により、荷重試験実施前から骨材周囲に発生していたASRひび割れ同士が繋がったためであると考えられる。

(2) せん断補強筋を配置した場合

せん断補強筋を配置したN-2、A-3供試体コアは、曲げスパン内から採取した。CT画像では、荷重による曲げひび割れが確認でき、両供試体で荷重によるひび割れの進展に伴った微細なひび割れが確認された。A-3供試体は、N-2供試体と比較してひび割れが多く確認され、特にA-3供試体では、荷重によるひび割れと並行した微細なひび割れが多く確認された。これは荷重によるひび割れが生じた際、ASR劣化によって生じていたひび割れがさらに拡大した可能性がある。

(3) 荷重試験未実施のコア

かぶりコンクリート部分はコンクリート表面に対し、水平なひび割れが卓越し、内部コンクリート部分は骨材粒子の形状に依存するひび割れが多いことが示されている。一方で、本研究において荷重試験を行わなかったA-2、A-4供試体のコアのCT画像から算出したひび割れ密度は、かぶりコンクリート部分と中央部とで明瞭な差異はなかった。

4.4 拘束検討供試体における面積ひずみと垂直ひずみ

縦拘束供試体における保存日数218日での各断面における体積ひずみを水平方向の面積ひずみと、垂直方向の垂直ひずみを図.8に示す。

無拘束の供試体や側面拘束された供試体では、水平断面と垂直断面のどちらにも同程度の膨張量を示す箇所がみられた。またいずれの断面でも、明確な面積ひずみを示す箇所を除き、小さな膨張を示す多くの箇所、垂直ひずみはみられないなど、膨張方向に偏りがみられた。一方、縦拘束の供試体では、面積ひずみの膨張が卓越し、垂直ひずみはほとんどみられなかった。

以上から、長さ変化率や拘束治具の変形の原因となる ASR 劣化による供試体内部の膨張箇所を、X 線 CT 画像を用いて示すことができた。無拘束の場合、側面で垂直方向にひび割れが生じた後、そこから水分が侵入し、側面から 20mm ほど内部での内部で網目状のひび割れが形成された。そのひび割れに方向性はない。ただし、供試体側面では、初期に生じたひび割れが広がるのみで細かな網目状を呈していない。縦拘束場合には、無拘束と同様に、側面付近と内部とのひび割れ状況に差が見られた。ただし、そのひび割れは拘束方向、すなわち縦方向のみに特化していた。一方、側面拘束された場合、拘束状態から側面付近で生じるひび割れは少なく、ゆっくりと水分が浸透した結果、内部で均等に膨張が生じた。

そのため、方向性も見られなかった。本研究では拘束治具の不備により、結果的に無拘束よりも膨張する結果となった。

これらの結果から、拘束検討供試体における無拘束の場合や縦拘束された場合に、側面で垂直方向にひび割れが生じて水分が侵入し、側面から 20mm ほど内部での膨張が大きくなった。縦拘束された場合は水平方向への膨張が卓越し、垂直方向への膨張はほとんど生じなかった。側面拘束では側面で生じるひび割れが少なく、ゆっくりと水分が浸透した結果、内部で均等に膨張が生じることで、結果的に無拘束よりも膨張する可能性がある。

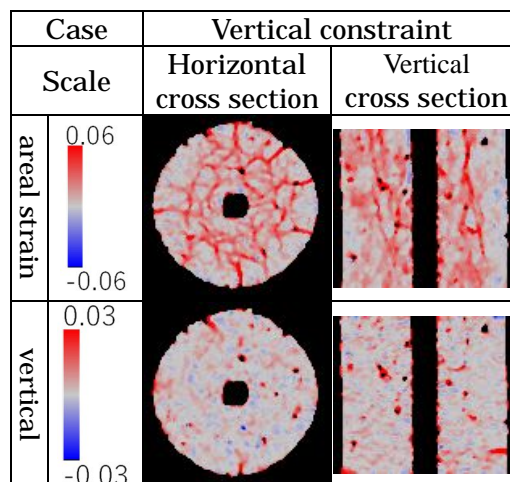


図.8 保存日数 218 日に関する各断面での面積ひずみと垂直ひずみ(縦拘束)

4.5 まとめ

研究目的に対して本研究により得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) はり供試体の載荷試験では、ASR 劣化を生じたせん断補強筋を配置しなかった供試体において、主鉄筋位置に生じていた ASR ひび割れが載荷によりさらに開口し、割裂ひび割れが発生した後、せん断引張破壊に至り、普通コンクリート供試体とは破壊形式が異なった。
- (2) はり供試体から採取したコアの X 線 CT 撮影では、ASR 劣化を生じた供試体コアにおいて、荷重によるひび割れと並行した微細なひび割れが多く確認され、ASR 劣化によって生じていたひび割れが載荷によりさらに拡大したと考えられる。
- (3) はり供試体の曲げ破壊に至ったケースにおいて、ASR 劣化を生じた供試体は普通供試体と比較して、最大荷重や変形挙動はほぼ同等であったものの、せん断補強筋に作用するひずみが増加することが示された。
- (4) 拘束検討供試体における長さ変化率や拘束治具の変形の原因となる ASR 劣化による供試体内部の膨張箇所の特徴を、X 線 CT 画像を用いた 3 次元画像計測により示せた。
- (5) 拘束検討供試体における無拘束の場合や縦拘束された場合に、側面で垂直方向にひび割れが生じて水分が侵入し、側面から 20mm ほど内部での膨張が大きくなった。縦拘束された場合は水平方向への膨張が卓越し、垂直方向への膨張はほとんど生じなかった。側面拘束では側面で生じるひび割れが少なく、ゆっくりと水分が浸透した結果、内部で均等に膨張が生じることで、結果的に無拘束よりも膨張する可能性がある。

引用文献

- T. Miyagawa, K. Seto, K. Sasaki, Y. Mikata, K. Kuzume and T. Minami, "Fracture of reinforcing steels in concrete structures damaged by alkali-silica reaction-field survey, mechanism and maintenance", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.1-17 (2006).
- S. Inoue, "Residual load carrying capacity of ASR damaged reinforced concrete beam after 12 years exposure", Proceedings of the 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.985-994 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 小池 綱士, 三方 康弘, 井上 晋	4. 巻 72
2. 論文標題 ASR劣化を生じたRCはり部材の耐荷特性と内部ひび割れ状況	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 298-304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.72.298	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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Y. Mikata and H. Tanaka
2. 発表標題 SHEAR CAPACITY OF PC BEAMS DAMAGED BY ASR
3. 学会等名 6th International Conference on Sustainable Construction Material and Technologies (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Fumoto, S. Kikuchi and Y. Mikata
2. 発表標題 OBSERVATION OF ASR EXPANSION CRACKS INSIDE CONSTRAINED MORTAR CYLINDER USING X-RAY CT
3. 学会等名 6th International Conference on Sustainable Construction Material and Technologies (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 麓 隆行, 菊池 慎太郎, 辰巳 貴仁, 三方 康弘
2. 発表標題 X線CTを用いた縦拘束の有無による円柱供試体内部でのASR膨張過程の比較
3. 学会等名 第77回セメント技術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 麓 隆行, 菊池 慎太郎, 辰巳 貴仁, 三方 康弘
2. 発表標題 X線CTを用いた拘束されたモルタル供試体内部でのASR膨張過程に関する考察
3. 学会等名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小池 絢士, 三方 康弘, 井上 晋
2. 発表標題 ASR 劣化を生じた RC はり部材の耐荷特性
3. 学会等名 2023年度関西土木工学交流発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小池 絢士, 三方 康弘, 井上 晋
2. 発表標題 ASR劣化したRC柱部材の経時挙動に関する研究
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Mikata, R. Matoba, T. Ura and T. Fumoto,
2. 発表標題 Shear capacity of RC beams damaged by combined deterioration due to ASR and corrosion
3. 学会等名 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Taniguchi, Y. Mikata and S. Inoue
2. 発表標題 Effect of ASR and corrosion on loading capacity and deformation performance of RC beam
3. 学会等名 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池 絢士, 三方 康弘, 井上 晋
2. 発表標題 A S R劣化を生じた R Cはり部材の耐荷特性と内部ひび割れ特性
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池 絢士, 三方 康弘, 井上 晋
2. 発表標題 A S R劣化を生じた R Cはり部材の耐荷特性と採取コアのひび割れ観察
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>材料劣化を生じたコンクリート構造物の安全性評価技術 http://www.oit.ac.jp/civil/~material/index.files/mikata.html</p>

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	麓 隆行 (Fumoto Takayuki) (30315981)	近畿大学・理工学部・教授 (34419)	

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