

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13868

研究課題名（和文）コンクリート構造物に生じたひび割れの時間依存性挙動のモデル化

研究課題名（英文）Modeling of time-dependent behavior of cracks in concrete structures

研究代表者

寺本 篤史 (Teramoto, Atsushi)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：30735254

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、コンクリートに生じたひび割れの補修工法の合理化を目的として、ひび割れ挙動に影響を及ぼす因子を調査した。調査対象は、1) 壁面温度、2) 降雨、3) ひび割れ発生原因（乾燥収縮、ASR）、4) ひび割れ幅、5) 外部部材による拘束、6) 凍結などであり、実構造物のモニタリングおよび数値解析を実施した。

その結果、コンクリートのひび割れは、温湿度の影響を受け、また、ひび割れ発生要因によっても変化することが明らかにされた。このことは、ひび割れの補修工法は大きな地域性を有することを示唆するものであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に、ひび割れ補修材と躯体の劣化機構として両者の界面の引張破断を前提とするなら、ひび割れ幅が最大となる時期に補修材の注入を行い、主に圧縮応力が作用するよう配慮した施工が望ましい。しかしひび割れ開閉挙動を適切に把握していない場合、上記の理想的なひび割れ補修工法は多くの場合実施されていない。

本研究の成果を基にすると、補修材には圧縮・引張が繰り返し作用し、加えて補修材そのものの温度変化による物性の変化も考慮しなければならないことがわかる。つまり補修材に十分な耐久性を期待する場合には、想定するひび割れ開閉挙動を正しく理解し、それに適した機能を有する材料の選定が重要であることが改めて確認された。

研究成果の概要（英文）：In this study, the factors that affect the crack behavior were investigated in order to rationalize the repair method for cracks in concrete structures. The target factors are 1) wall temperature, 2) rain, 3) cause of cracking (drying shrinkage, ASR), 4) crack width, 5) restraint by external members, 6) freezing, etc. For this purpose monitoring and numerical analysis of the actual structure were carried out.

As a result, it was clarified that the crack of concrete is affected by the temperature and humidity and also changes by the factors causing the crack. This suggests that the crack repair method has great regional characteristics.

研究分野：建築材料

キーワード：コンクリート構造物 ひび割れ ひび割れ開閉 補修材 モニタリング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年建設業界で最も盛んな研究分野に“画像解析”による検査ツールの開発が挙げられる。特にコンクリート構造物では、構造物の変状を示す指標として「ひび割れパターン」を画像により取得する手法が開発の途上であり、現場での採用事例も増加傾向にある。さらに、ひび割れパターン画像を取得した後の展開として、人工知能にコンクリートのひび割れパターンを学習させ、任意のひび割れパターンから構造物の余寿命を推定する手法などが提案されている。以上のように画像解析を用いたコンクリート構造物の外観検査手法は日々開発が進んでいるが、更なる高精度化・一般化に際し大きな課題を抱えている。

建設分野における検査対象物(構造物)は一枚の画像の画角に収まらないことが多く、固定点から検査対象構造物全体の画像を連続的に得られることはほとんどない。そのため画像解析の諸元として使用される画像は、ある特定の画角で「ある特定の時刻」を切り取ったものとならざるを得ない。すなわち、取得される画像のほとんどが時間分解能を有していない。このような画像から、例えばひび割れ開閉などの「ひび割れの時間依存性」を考慮することは極めて困難である。一方で、ひび割れの開閉挙動はひび割れの方向性や幅と並んで、その劣化が生じた原因を特定する際の情報として重要性が高く、また、ひび割れ発生後の補修工法を策定する際にも必要不可欠な情報である。今後、検査の省力化を目的として ICT を駆使した新たな検査手法が拡大することが予測されるが、コンクリート構造物の診断精度の向上のためには、時々刻々変化するひび割れの開閉挙動を把握することが重要であり、その一つの方法として静止画像からひび割れの開閉挙動を推定する手法を構築することは大きな社会的意義を有していると考えられる。

SIP 事業の一環として、全国の国道および高速道路に架かる 20 万橋梁の劣化損傷に関するデータを用いて、生存解析と多変量解析を駆使してビッグデータ分析が実施されている。この研究事例において、地域や事業主体を分けずに日本全体にわたる橋梁を対象として解析を実施した場合、地域ごとに分けて解析した場合と比べてリスク評価の精度が落ちることが報告されている。このことは、コンクリート構造物に生じる劣化原因が地域性を有していること、また地域の環境条件に応じてひび割れパターンの時間依存性挙動が変化することを示唆している。

例えばアルカリ骨材反応(ASR)や硫酸塩劣化などのコンクリートの過度な膨張に起因する劣化では、「亀甲状のひび割れ」もしくは「拘束方向のひび割れ」が導入されることがよく知られているが、ASR については使用する骨材の特性により発現の有無が決定するので、“骨材産地”という地域性を有している。また、海岸付近のコンクリート構造物では、塩害による鉄筋腐食を原因とした鉄筋に沿ったひび割れが発生する可能性が高くなる。そのほか乾燥収縮ひび割れの発生確率も、降水量(雨掛かり量)の多寡により大きな影響を受けると推察される。

ひび割れ発生後の開閉挙動についても、構造物の他の部材や鉄筋から受ける拘束の影響のほかに、温湿度の日変動、年変動、および降水量(雨掛かり量)などの地域特有の外部環境が大きな影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、従来のひび割れの時間変化挙動に関する研究は、ある単体の構造物の分析に終始し、周辺構造物との類似性や、他の地域の構造物との相違など、地域性に着目した研究はほとんど見られないのが現状である。

### 2. 研究の目的

コンクリート構造物のひび割れ補修方法に関して、例えば「建築改修工事監理指針」に、一般的な補修材の選定方法が記載されている。この指針では、補修材選定フローとして、「ひび割れ部の漏水の有無」、「ひび割れ部の挙動の有無」、「ひび割れ幅」が規定されている。しかし、「ひび割れ部の挙動の有無」に関しては、実際にひび割れ開閉挙動を取得することの労力の大きさから、実測定値を使用せず、経験によって判断している場合が多い。即ち、補修材の選定が十分な工学的根拠に基づいて行われているとは言えない。この結果として、補修後に、補修部から再びひび割れが発生する事例もみられ、コンクリート構造物のひび割れ開閉挙動をより簡便かつ高精度に実測あるいは推定する手法が求められている。

そこで本研究では、温・湿度の日変動、年変動、降水量(雨掛かり量)、および風量などの環境条件のうち、ひび割れの時間依存性挙動に影響を及ぼす因子を明らかにし、ひび割れ開閉挙動の推定モデルを提案すること、ならびにコンクリート構造物のひび割れ発生原因に応じたひび割れの時間依存性挙動の差異を示すことを通して、ひび割れの時間依存性挙動における地域性を明らかにすることを目的とする。

実際に構造物のひび割れ開閉挙動を測定した既往の研究では、構造物に生じたひび割れの開閉挙動は、壁面の環境要因によって大きな影響を受けることが報告されているが、それぞれの要因を定性的、定量的に整理するまでには至っていない。

本研究では、モニタリング対象となるひび割れの選定に際し、極力複雑な要因が含まれないための配慮として、比較的単純な形状を有する乾燥収縮による貫通ひび割れを対象とした。壁面温度とひび割れ開閉挙動の相関について検討する場合、日射条件や気温の日変動、年変動は地域や対象建物によって全く異なることが予想されるため、著者らの研究グループは、日本の各都市におけるひび割れ開閉挙動のデータを蓄積していく計画を持っているが、本研究ではまず、北海道札幌市における構造物を対象としてひび割れ開閉挙動のモニタリングを実施した。さらに、上記モニタリング結果の合理性を検証するため、簡易な解析モデルを利用して、温度変動や部材の拘束条件がひび割れ開閉挙動に及ぼす影響を定性的に把握することを目的とした。

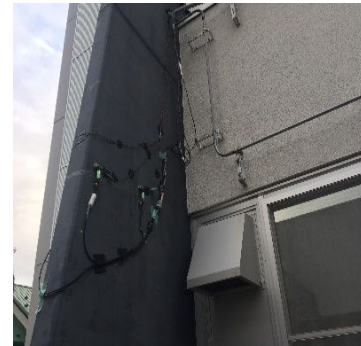
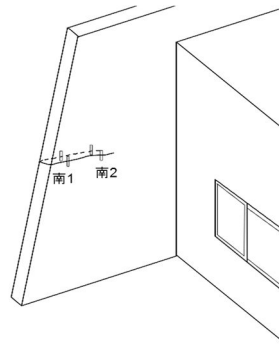
### 3. 研究の方法

#### 3.1 実構造物のモニタリング

実構造物に生じたひび割れの開閉挙動は気候区分によって異なると考えられるため、北海道、名古屋、広島、沖縄の各地から選定した。また、対象とした構造物は、壁面に乾燥収縮による貫通ひび割れを有し、かつ長期間のモニタリング測定の許可が得られたものとした。その一例として北海道で実施したモニタリングの概要を示す。

対象建物は、北海学園大学工学部山鼻キャンパス1号館であり、測定期間は2018年9月から2019年7月である。測定対象部材は、対象建物から張り出した擁壁であり、南面から北面に貫通した乾燥収縮ひび割れが生じている。東側で対象建物と接合しているため、東側方向でひび割れ挙動は拘束を受けることが予測される。また、上部には拘束材となる梁が存在せず、西側は比較的外部拘束が小さい。

亀裂変位計によるひび割れ挙動の測定は、上記擁壁の南側と北側で行った。実際のモニタリングの様子を図-1に示す。また、壁面温度の影響を把握するため、変位計設置箇所の極近傍に熱電対を設置し、壁面の温度の経時変化を同時に測定した。



対象ひび割れの位置

実際測定の様子

図-1 実構造物におけるひび割れ挙動長期間測定概要(北海学園大学工学部1号館)

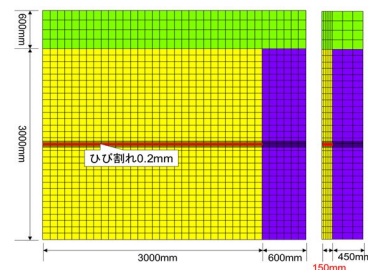
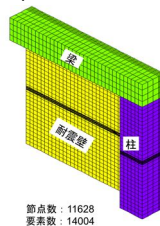


図-2 解析モデル概要

#### 3.2 数値解析による検証

ひび割れ開閉挙動の要因を個別に検討するため、実構造物におけるモニタリング結果に基づいて数値解析を実施した。本節ではひび割れ開閉挙動に及ぼす温度変化および拘束度の影響について記す。本解析には3次元温度応力解析プログラムJCMAC3を使用した。

本解析では、厚さ150mmを有する柱・梁付き壁において、高さ方向(Z軸)の中心に初期幅が0.2mmの模擬貫通ひび割れを導入した。壁面の配筋は、ダブルの鉄筋要素(D10に相当)を150mmピッチで設置した。このとき、鉄筋要素の設置にはモデルの連続性が必要であったため、模擬貫通ひび割れ要素は、厚さが0.2mmの著しく剛性が小さい( $E = 2\text{MPa}$ )要素に置き換えた。上記の模擬貫通ひび割れは、壁部分のみに存在し、柱部分は通常の剛性を使用している。解析モデルのひび割れ直行方向の高さは実構造物に近い3000mmと設定した。また、ひび割れ開閉挙動に及ぼす周辺部材の拘束の影響を再現するため、断面積が600×600mmの梁・柱を設置した。

実構造物において、熱変形に対する周辺部材の拘束度は不明である。特に実構造物の温度膨張による高さ方向(Z軸)への変形に関しては実測データがほとんどない。仮に、梁要素上部の境界条件を完全固定とした場合、実構造物の拘束条件より著しく厳しい状態となり得る。よって今回の解析では、柱要素の剛性は一定(22GPa)とし、梁要素上部を完全固定のうえ、梁そのものの剛性を変動させることで、実構造物のひび割れ開閉挙動の再現を試みた。図-2に解析モデルの概要を示す。コンクリート要素の伝熱・応力物性は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」を参考に設定した。

### 4. 研究成果

札幌市において、2018/9/1から2018/11/30までの期間に測定した。測定期間中における壁面温度は、細かな日変動を伴いながら9月から11月にかけて緩やかに低下している。また、壁面は気温の日変動の影響を受けながら温度上昇、下降サイクルを繰り返すこと、日光が直射する南面において日中の壁面温度が北面より10°C程度高くなっている。測定期間中において、ひび割れ開閉幅は南1で0.09mm、北1で0.05mmであった。

既往の研究で指摘されている通り、ひび割れの開閉挙動は壁面温度と強い相関があることが推察される。そこで、ひび割れ開閉に及ぼす壁面温度の影響を明らかにするため、壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係を図-3に示す。なお、図-3では、日射による壁面温度の日変動の影響を取り除くため、測定期間における午前7時時点のデータのみを抽出している。図より、ある程度のばらつきがみられるものの、南面、北面ともに、壁面温度の上昇に伴って、ひび割れ幅が減

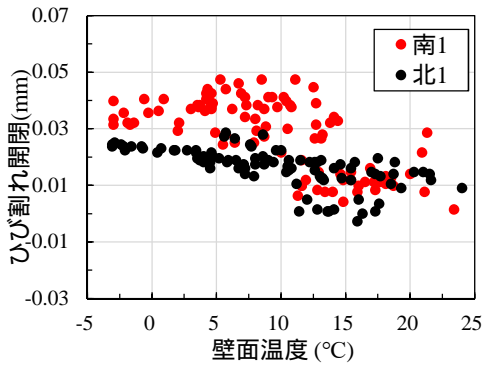


図 - 3 壁面温度とひび割れ開閉の関係  
(南1, 北1)

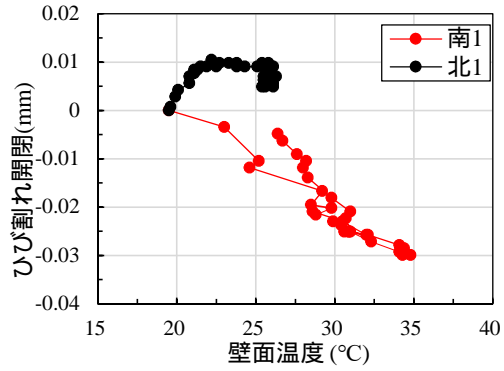


図 - 4 9月12日の壁面温度の日変動  
(南1, 北1)

少する結果が見られた。

次に、日射によって壁面温度に比較的急速な変動が生じる場合に関して、日射の影響が比較的強い9月12日の壁面温度のデータを抽出したものが図-4である。図-4に示されるように、南面は図-5と同様に壁面温度の上昇に伴ってひび割れが閉じるが、北面のひび割れは、南面とは逆に開く傾向が確認できる。すなわち、壁全体がそり変形を起こすようなひび割れ開閉挙動が生じている。この壁全体のそり変形は、壁内の温度分布に起因するものと推察される。

季節変動のように、緩やかに壁面温度が変化する場合、壁面断面内の温度分布はほとんどないと考えられる。壁内に温度分布がない理想的な状態を考えた場合、壁内全体の温度上昇によるひび割れの挙動は、温度の上昇によりコンクリートおよび鉄筋には熱膨張が生じるため、対象壁のひび割れ幅の変動を拘束する部材(外周の柱や梁等)が存在しなければ、壁全体が変形しひび割れは開く方向に挙動すると予測されるが、実構造物のように、周辺部材からも拘束を受ける場合、熱膨張による壁全体の变形は、变形しやすいひび割れ部を埋めるように挙動することが考えられる。

一方、壁内に温度分布が生じている場合のひび割れ挙動は、壁面の温度上昇によって、南面にはひび割れを閉じる方向にコンクリートの变形が生じるのに対して、北面には温度变形の駆動力が生じない。この時、壁面内に存在する鉄筋を介して、南面と北面の膨張量の差異が壁の反り変形を引き起こす。つまり、南面にはひび割れを閉じる方向の駆動力が、北面にはひび割れを開く方向の駆動力が生じると考えられる。その後、壁面内の熱の移動や、周辺気温の上昇により、壁面北側の温度が上昇した場合、南北間の温度差に起因するそり変形は低減され、ひび割れを閉じる駆動力が増大し、両者の成分が平衡に達した後、北面のひび割れは閉じる方向に転換する。

以上の考察をまとめたものが図-7の概念図である。壁面温度がひび割れの開閉挙動に及ぼす影響は、年変動のように温度変化が緩やかな場合と、日射を伴う日変動のように比較的急速な変動の場合で異なることが分かる。

仮にひび割れに補修材が注入されている状況を想定した場合、断面内に温度分布が生じない緩やかな温度変動のみが生じるとすると、ひび割れ内の補修材には、一様な圧縮応力もしくは引張応力が生じると考えられる。このとき、補修材と躯体の劣化機構として両者の界面の引張破断を前提とするなら、ひび割れ幅が最大となる時期に補修材の注入を行い、主に圧縮応力が作用するよう配慮した施工が望ましい。一方、壁全体にそり変形が生じる挙動を考慮した場合、補修材には圧縮・引張が繰り返し作用し、加えて補修材そのものの温度変化による物性の変化も考慮しなければならない。補修材に十分な耐久性を期待する場合には、想定するひび割れ開閉挙動を正

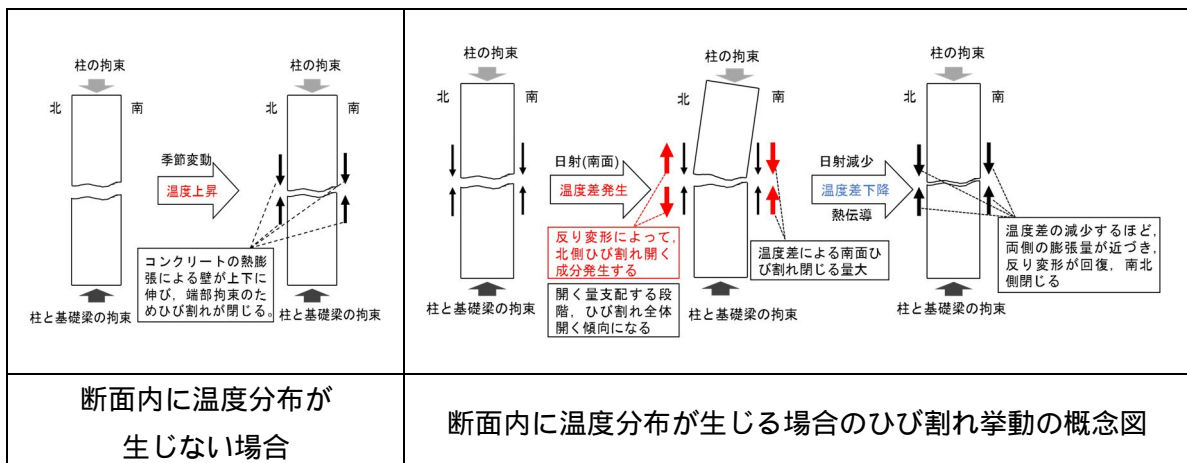


図-5 ひび割れ開閉挙動の概念図

しく理解し、それに適した機能を有する材料の選定が重要である。

上記で述べたモニタリング結果を参考に、壁面温度が緩やかに変化する場合と急速に変化する場合の2つの条件を想定して数値解析を行った。

外気温の昇温速度を $+0.1$  /hとした場合の解析結果、昇温速度を小さくし、南面と北面との温度差が小さくなるようにした場合、模擬ひび割れの相対変位は、南面、北面ともに閉じる方向に挙動する。これは、図-3の結果を再現する結果である。一方、同様の拘束条件で、南北面に顕著な温度差が発生するように外気温の昇温速度を $+5.0$  /hと変更し南面の温度のみ急激に増加する場合、南面のひび割れ開閉は壁面温度の上昇に伴い、より大きな傾きをもって閉じる方向に挙動する。一方、北面のひび割れ開閉は、南北面の温度差が大きい初期段階には、ひび割れは開く方向に挙動し、その後、閉じる方向に転じた。この解析結果も図-4の結果を概ね再現するものであった。以上の結果より、外部拘束条件が同じ場合であっても、壁面の昇温速度によって発生するひび割れ挙動の正負が反転する可能性があることが確認された。これまでの議論で言及した壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係が、どのような構造物・部材でも生じうるのかを検証するために、対象壁の拘束条件を変化させ、壁面温度の変動によるひび割れ開閉挙動に対する拘束度の影響についても検討した。その結果、梁上部を完全固定したうえで梁のヤング係数を大きくすることで、ひび割れ直行方向上部への変形が著しく抑制され、コンクリート部材の温度上昇による膨張が、ひび割れを閉じる方向にしか作用できないことが原因と考えられた。

このことから、壁面温度によるひび割れの開閉挙動は、周辺の拘束条件の影響を受け、その方向性が変化することが確認された。一方で、数値解析上の拘束条件が、現実の建築構造物で存在し得るのか否かについては未確認のため、今後の実測データを増やすことで検証していきたい。

本報告書では、北海道のモニタリング事例をとり、壁面温度と拘束の影響についての成果を報告したが、本研究ではその他にも、コンクリートに生じたひび割れの時間依存性挙動に影響を及ぼす因子である1)降雨、2)ひび割れ発生原因(乾燥収縮、ASR)、3)ひび割れ幅、4)凍結などを対象に、実構造物のモニタリングを実施した。その結果、得られた成果は以下のとおりである。

[1]実構造物の貫通ひび割れの開閉挙動は、壁面温度の変化に依存し、壁面そのものの温度変化によるコンクリートの膨張・収縮ならびに、壁断面に生じる温度分布に起因する壁のそり変形の影響を受ける。上記の機構により、ひび割れの開閉挙動は、壁面温度の日変動と年変動とで、逆方向に動く場合がある。

[2]同じ温度環境においても、ひび割れの方向性、幅、対象部材の拘束状態によってひび割れの開閉挙動は異なる。また、貫通ひび割れと貫通でないひび割れでは、温度の上昇(低下)時のひび割れ挙動が逆になる傾向が得られた。

[3]降雨のあった日の屋外側のひび割れは、閉じる方向に挙動する。この挙動は、降雨によって含水率が上昇したコンクリートが膨張することで、ひび割れが閉じる方向に動いていると考えられる。

[4]北海道のモニタリング結果より、氷点下において、壁面温度とひび割れ開閉挙動の関係が逆転する結果が得られた。この現象について、既往の文献から挙動の要因を推定したところ、対象壁面のコンクリートの細孔構造は粗大化しており、0 近辺で負の線膨張係数を持つ状態になっている可能性が考えられた。

以上の測定結果のうち、ひび割れ発生原因、ひび割れ幅、外部部材による拘束に関しては、数値解析によっても同様の傾向を再現できており、RC構造物の一般的な傾向であると推察された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 2件）

1. 著者名 張 玉露, 寺本 篤史, 金澤 健, 大久保 孝昭	4. 巻 41
2. 論文標題 乾燥収縮ひび割れの開閉挙動に及ぼす壁面温度と部材拘束条件の影響に関する研究	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 425-430
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 戸田 滉大, 寺本 篤史, 金澤 健, 大久保 孝昭	4. 巻 42
2. 論文標題 実建造物の氷点下時におけるひび割れ開閉挙動に関する研究	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 -
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 寺本 篤史, 大久保 孝昭
2. 発表標題 RC 建造物のひび割れ挙動の測定方法と拘束の影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺本 篤史, 大久保 孝昭
2. 発表標題 RC建造物のひび割れ開閉挙動に関する研究
3. 学会等名 セメントコンクリート研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸田 滉大, 寺本 篤史, 大久保 孝昭
2. 発表標題 RC構造物におけるひび割れ挙動の影響因子に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----