

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 22 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04312

研究課題名（和文）コンクリート構造物の体積変化に伴うひび割れ予測評価手法の高精度化

研究課題名（英文）Improving accuracy of prediction evaluation method for cracking with volume changes in concrete structures

研究代表者

溝淵 利明（MIZOBUCHI, Toshiaki）

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：60339504

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）：マスコンクリート構造物の体積変化に伴うひび割れ発生の予測のための解析技術は、この30年ほどで飛躍的に進歩している一方で、解析に用いる設計用値としての力学特性や熱特性等の諸特性に関しては、解析技術ほど十分な精度を有しているとは言い難い現状にある。そこで、本研究では現場で簡便にひび割れの予測解析に必要な設計用値の取得及び評価が可能なシステムを開発するために、簡易物性評価試験から得られた特性値の最適化手法の開発、温度依存性を考慮した直接引張強度試験法の開発、体積ひずみ変化率を導入した新しいひび割れ予測解析手法の提案及び若材齢時のクリープ特性評価のための簡易試験法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、現場で簡便に熱特性を最適化することができ、温度依存性を考慮した力学特性を把握することができることから、施工予定のコンクリート構造物のひび割れ予測精度を大幅に向上させることが可能になることである。また、これまで分離が難しかった体積変化に伴うひずみ成分を極力統合することで、解析自体の簡易化を図るとともに、予測精度低下の原因の一つであった設計用値の選定を現場で簡便に評価できるシステムの構築を目指したことである。特に、本研究で開発した簡易物性評価試験法は国内の現場のみならず、海外の現場においても用いることができ、現地の材料を用いたひび割れ解析に必要な設計用値を簡便に取得することが可能である。

研究成果の概要（英文）：While analysis technology for predicting the occurrence of cracking with volume changes in mass concrete structures has made great strides in the last 30 years, mechanical properties and thermal properties as design values used for analysis have been improved. Regarding various characteristics, it is difficult to say that they have sufficient accuracy as analysis technology. Therefore, in this study, in order to develop the system that can easily acquire and evaluate the design values required for crack prediction analysis in the field, the method for optimizing the characteristic values obtained from the simple physical property evaluation test was developed. Furthermore, the direct tensile strength test method that takes temperature dependence into consideration, the new crack prediction analysis method that introduces the volume strain change rate, and the simple test method for evaluating creep characteristics at a young age were developed.

研究分野：コンクリート材料・施工

キーワード：ひび割れ 設計用値 温度応力 簡易評価手法 若材齢クリープ 直接引張試験法

1. 研究開始当初の背景

(1) コンクリート構造物の老朽化に伴う劣化

土木分野における鉄筋コンクリート構造物の多くは、マッシブなコンクリート構造物であり、セメントの水和発熱に起因する体積変化(温度変化に伴う膨張・収縮及び自己収縮等の硬化収縮)によってひび割れが生じる場合がある。この体積変化に伴うひび割れは、コンクリート構造物の初期欠陥として問題となるだけでなく、耐久性の低下にも大きな影響を与えることから、極力防止または制御する必要がある。そのためには、体積変化に伴うひび割れ発生の可能性を事前にできるだけ精度よく予測し、ひび割れ防止または制御のための対策を講じる必要がある。

コンクリート構造物の体積変化に伴うひび割れ発生の予測のための解析技術は、この30年ほどで飛躍的に進歩しており、現在では実構造物の細部までモデル化した大容量の3次元有限要素解析が市販のソフトで比較的容易に行われるようになってきている。さらに、ひび割れ発生の予測解析だけでなく、ひび割れ幅解析も市販のソフトを用いて比較的容易に行えるようになってきている。

上述したように、解析技術は飛躍的に向上し高精度化しているが、一方で解析に用いる設計用値としての力学特性(引張強度、ヤング係数等)や熱特性(断熱温度上昇特性、熱膨張係数等)の諸特性に関しては、解析技術ほど十分な精度を有しているとは言い難い。現状において、断熱温度上昇試験装置のように高価な試験装置を有しているところは少なく、設計用値を事前に全て精度よく把握することは、現状では難しいところはある。しかしながら、ひび割れ発生に直接影響を与える引張強度に関しては、比較的簡便に実施できる割裂引張試験法があるにもかかわらず、実際の工事での品質管理項目として行われることはほとんどないのが現状である。さらに、体積変化に伴って生じる応力を推定するために必要な設計用値であるヤング係数等の変形特性や若材齢時でのクリープ特性なども実工事で検討されることは少なく、示方書や指針等に準拠しているのが現状である。これらの指針類は、既往の研究成果やメーカーの技術資料を基に作成されたものであり、適用する工事で用いる材料配合から得られる設計用値と適合していない場合、ひび割れ予測精度が大きく低下することとなる。

体積変化に伴うひび割れは、比較的若材齢時であり、マッシブなコンクリート構造物では、その期間内でセメントの水和熱によって部材内は数十の温度変化が生じている。引張強度やヤング係数などは、当然セメントの水和速度に大きく影響を受けており、この温度影響(温度依存性)を考慮した設計用値とすべきであるが、現行の指針類ではこの温度依存性を十分考慮したものになっていないのである。

このような現状では、いくら解析技術が高精度化しても使用する設計用値が同様に精度向上していかなければ、ひび割れ発生の可能性の予測精度自体向上しないこととなる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上述した現状の問題点を解決するために、現場で簡便にひび割れの予測解析に必要な設計用値の取得及び評価が可能なシステムを開発することである。本研究では、以下に示す4つの研究目的を基に遂行した。

(1) 簡易物性評価試験から得られた特性値の最適化手法の開発

これまでクリープ特性を除く温度依存性を考慮した引張特性及び変形特性に関して、断熱容器を用いた簡易物性評価手法を提案している。しかしながら、これまでの検討において温度計測結果から断熱温度上昇特性を同定する計算過程で、解析結果と計測結果を人が見て判断する方法がとられる場合があり、断熱温度上昇特性が必ずしも最適化されたものではなかった。そこで、本研究では簡易物性評価手法の課題を解決することを目的として、これまで人の判断に頼っていた同定結果を、数値解析的に行うための粒子群最適化手法(PSO: Particle Swarm Optimization)を用いて断熱温度上昇特性の各変数(終局断熱温度上昇量、上昇速度に関する定数)を同定することとする。

(2) 温度依存性を考慮した直接引張強度試験法の開発

既往の研究において、割裂引張強度が直接引張強度よりも過大に評価しているという研究結果が報告されている。また、これまで開発してきた簡易物性評価試験装置では圧縮ヤング係数の測定は可能であるが、引張ヤング係数の測定が難しいという課題を有していた。

本研究では、容器内に直接引張試験用供試体を封緘状態で設置できる試験装置を開発する。さらに、供試体作製時に引張治具を取付け、現場でも取り出してすぐに試験実施が可能になるようにする。これにより、温度依存性を考慮したマス養生下での直接引張強度を把握することができ、さらにひずみ計を埋設しておくことで、引張ヤング係数を測定することも可能となる。この試験装置を用いれば、直接マスコンクリート部材内のマス養生下での直接引張強度を用いてひび割れ発生の予測を行うことが可能となる。さらに、現場でも試験ができる簡易引張試験装置を用いることで、部材内部に近い引張特性を把握することが可能となる。

(3) 体積ひずみ変化率を導入した新しいひび割れ予測解析手法の検討

これまでのひび割れ予測解析では、熱膨張係数を用いて温度ひずみを算定し、自己収縮ひずみ

は別途予測式等を用いて算定していた。本試験装置では、温度ひずみと自己収縮ひずみを同時に測定していることから、本研究では両者を分離することなく、両者を含んだ温度変化に伴う体積ひずみ変化率として新たに定義し、従来の熱膨張係数及び自己収縮ひずみを用いないで体積ひずみ変化率からひび割れ予測解析を実施する方法を提案していく。

(4) 若材齢時のクリープ特性評価のための簡易試験法の開発

若材齢時のクリープ特性に関しては、簡易物性評価試験装置を用いて行うことが難しいことから、簡易クリープ試験装置を開発し、若材齢時でのクリープ特性を把握する。この試験装置は、アクリル容器に上下の端版にOリングを組み込んで、ほぼ完全な密封状態で中央に配したPC鋼棒を引っ張ることにより、打込み後の任意材齢に一定荷重を生じさせることが可能である。供試体自体運搬可能であることから、温度条件を変化させることも可能である。この試験装置で得られた弾性ひずみ、クリープひずみを基にクリープ係数を算定し、それを基にヤング係数の低減係数を算出するものとする。

3. 研究の方法

本研究で掲げた4つの目的を達成させるとともに、複数の実際の現場で本評価手法を適用するとともに、実構造物での計測を行い、計測結果と事前のひび割れ予測解析結果を比較し、ひび割れ予測精度の検証を行った。さらに、当大学で保有する温度応力シミュレーション装置を用いて、体積ひずみ変化率の妥当性、簡易クリープによる低減係数の算出結果の妥当性についても検証した。

4. 研究成果

(1) 温度依存性を考慮した引張強度特性

本検討では、6種類のセメントを用い、各セメントについて水セメント比3水準(0.45, 0.50, 0.60)の計18ケースについて簡易物性評価試験装置を用いた力学特性試験を行った。各ケースとも打込み温度は20℃とした。また、使用した骨材は粗骨材が青梅産の硬質砂岩砕石で最大粗骨材寸法20mm、表乾密度2.65g/cm³、吸水率0.48%、細骨材が大井川産川砂で表乾密度2.58g/cm³、吸水率1.99%、粗粒率2.69である。

力学特性試験は、材齢3日、7日、14日、28日の4材齢において圧縮強度試験(Φ100mm, 高さ200mm)、割裂引張強度試験(Φ100mm, 高さ200mm)および直接引張試験(Φ100mm, 高さ370mm)を行った。また、比較のために標準養生した供試体について同材齢において圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った。

簡易物性評価試験装置は、発泡スチロール製の温度計測部と力学特性試験用供試体収納部から構成されている。温度計測部はΦ300×450mmの円柱で、温度とひずみ量を計測できるものとなっている。この部位から生じるセメントの水和発熱により、部材厚1m~1.5m程度の部材中央部に近い温度履歴を再現しており、温度測定は円柱中央部に熱電対を設置して行った。温度計測部の両側には、Φ100×200mmの供試体を24本収納して、マス養生下での力学特性試験に供した。また、各材齢での試験時に取り出した供試体部分には、断熱ブロックを詰めることで断熱状態を保つようにした。

マス養生下での直接引張強度特性については、図-1に示すように簡易物性評価試験装置の力学特性試験用供試体収納部にΦ100mm×370mmの供試体を12本収納して行った。供試体は、両端に引張治具を固定するためのボルトを埋め込み、供試体中央部には断面欠損リング(外径100mm, 内径80mm)のドーナツ状のリングで、断面欠損率36%を設置して、供試体中央部で破断させるようにした。

引張強度試験結果の一例として、普通ポルトランドセメントを用いたケースの直接引張強度、マス養生下での割裂引張強度および標準養生での割裂引張強度を図-2に示す。

図-2から、標準養生した場合がマス養生した場合に比べて同一有効材齢で比較すると高い傾向を示した。また、マス養生下での試験方法の違いを比較した場合、直接引張強度の方が割裂引張強度よりも低くなる傾向を示した。試験方法の違いを比較するために、全ケースを用いて同一有効材齢における両者の関係について比較を行った

結果を図-3に示す。図-3から、引張強度が2N/mm²以下の範囲では直接引張強度が割裂引張強度よりも若干高くなっているものの、2N/mm²を超える範囲では直接引張強度が割裂引張強度よりも低い結果となった。

次に、各セメントおよび水セメント比での試験結果を基に式()に示すように、引張強度を直接推定できる引張強度発現式(以後、直接法と称する)を求めた。

$$f_i(t_c) = \eta \ln(t_c) + \zeta_i = a_1 \times e^{(C/W) + \beta_1} = a_2 \times e^{(C/W) + \beta_2} \quad ()$$

ここで、 a_1 、 β_1 、 a_2 、 β_2 はセメントの種類に応じた引張強度の発現を表す係数であり、 C/W はセメント水比(適用範囲: 1.67~2.22)である。

式()を用いた推定結果と本検討での試験結果との関係を図-4に示す。図-4から、各試験法での推定値とも相関係数が0.97以上であり、直接法による方法は比較的高い推定精度を有していると思われる。

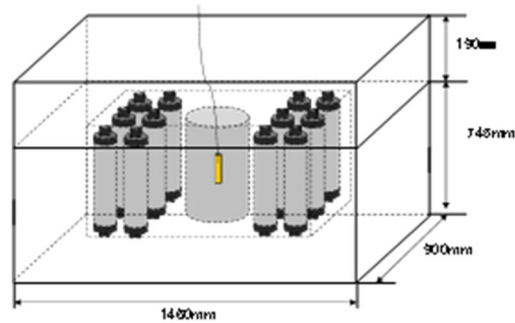


図-1 簡易直接引張試験装置

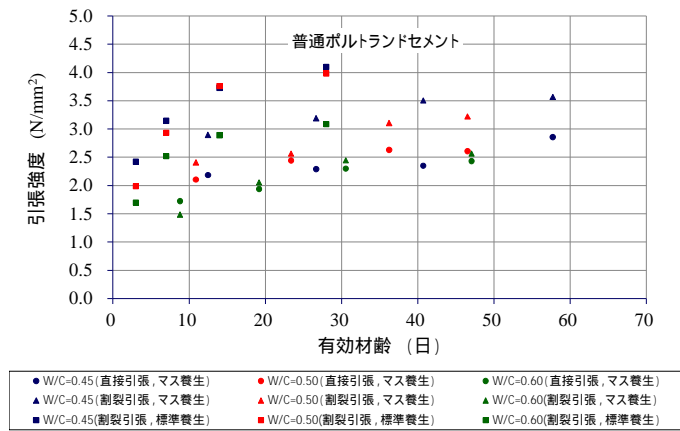


図 - 2 引張強度試験結果

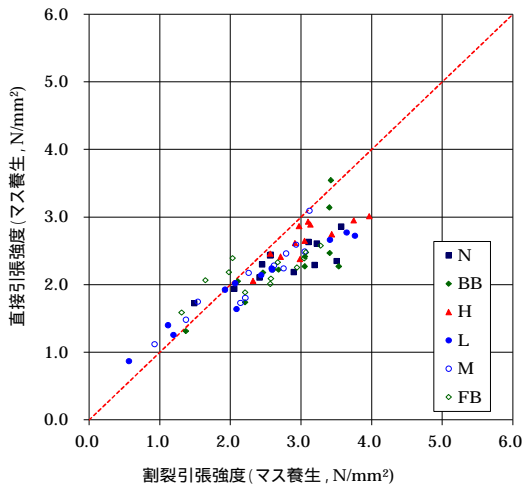


図 - 3 引張強度の比較

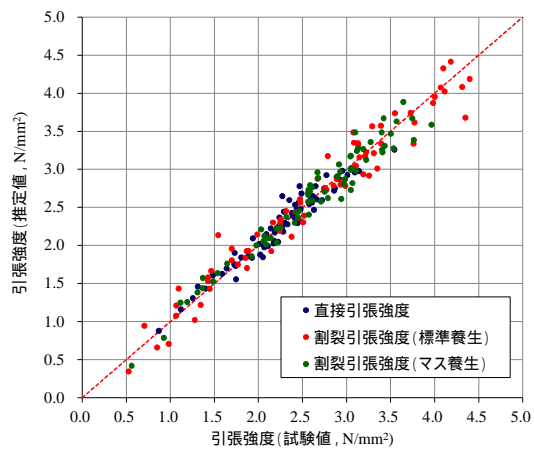


図 - 4 推定式と試験値との比較

(2) 引張強度とひび割れ発生時応力との比較

実構造物での物性評価を室内で実施するために温度応力シミュレーション装置を用いた検討を行った。TSTM は、自由に膨張・収縮が可能な無拘束状態の供試体(無拘束供試体)および任意の拘束度を与えることが可能な供試体(拘束供試体)から構成されている。この2つの供試体に対象とした構造物の温度履歴を与え、無拘束供試体で生じたひずみに対して、設定した拘束度に相当するひずみを拘束供試体に与えることで、打込み開始からひび割れ発生までの部材内部の体積変化に伴う膨張・収縮挙動をシミュレートすることが可能な試験装置である。TSTM 自体は、一軸拘束状態での応力挙動をシミュレートする装置であることから、シミュレーションが可能な構造物としては、壁状構造物のような壁長さ方向に応力が卓越するものが対象となる。また、各供試体は、試験中に水分の逸散がないように、供試体周囲をポリエチレンシートで覆っている。なお、供試体には拘束供試体に5箇所、無拘束供試体に3箇所温度計を設置し、各供試体の温度計測結果と設定した温度に差異がないようにしている。各供試体のひずみは、供試体両側面に設置した変位計(計測長750mm)から計測された変位を基に求めている。なお、試験の開始は凝結始発時としている。

本検討で提案した直接法による引張強度発現式の推定精度を検証するために、TSTM によるひび割れ発生時応力との比較検討を行った。その一例として、普通ポルトランドセメントを用いた W/C=0.55 の場合の TSTM の応力履歴と各試験方法での引張強度発現を図 - 5 に示す。ただし、有効材齢は、各ケースでの TSTM の温度計測結果から算定した。拘束度は、全ケースとも 1.0 である。また、比較のために従来法による引張強度発現も図 - 5 に示す。

図 - 5 から、TSTM によるひび割れ発生時の応力が 1.95N/mm^2 であったのに対して、破断時の直接引張強度が 2.06N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.05)、マス養生下での直接法および従来法による割裂引張強度が 2.27N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.16) および 2.30N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.18) であった。一方、標準養生での直接法および従来法による割裂引張強度が 3.27N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.67) および 3.29N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.69) であり、危険側の評価結果となった。

次に、本検討で比較検討した全ケース(22 ケース)のひび割れ発生時の応力とその時点での温度ひび割れ指数との関係を図 - 6 に示す。図 - 6 から、直接引張強度は破断時の温度ひび割れ指数が 1.10 以下(標準偏差で 0.13, 平均が 0.92)であり、マス養生下での直接法および従来法

による割裂引張強度破断時の温度ひび割れ指数が 1.30 以下（標準偏差で 0.16，平均が 1.04）および 1.40 以下（標準偏差で 0.17，平均が 1.05）であった。ただし，直接引張強度は破断時の引張応力が 2.4N/mm^2 以上の範囲において温度ひび割れ指数が 0.6~0.7 となり，かなり安全側の評価となっており，比較的高引張領域でのひび割れ発生時強度の推定精度として課題があり，今後推定精度向上に向けた検討を行っていく必要があると思われる。

他方，標準養生での直接法および従来法による割裂引張強度破断時の温度ひび割れ指数が 1.80 以下（標準偏差で 0.20 および 0.21，平均が 1.43 および 1.45）であり，マス養生下での引張強度に比べてばらつきが大きく，本検討では全体に危険側の評価をする傾向にあった。

以上の結果から，これまでのように標準養生した供試体による引張強度の推定は，ひび割れ発生に対して危険側の評価を行う可能性があり，温度影響を考慮したマス養生下での引張強度で評価すべきではないかと思われる。また，マス養生下での引張強度推定に対しては，従来法と直接法でほぼ同程度の推定精度であったことから，圧縮強度を介さずに推定できる本検討で提案した直接法を適用しても，従来法と同程度の精度で推定が可能であることが確認できた。

さらに，本検討の範囲ではマス養生下での直接引張強度を用いた直接法の推定精度が他の手法に比べてよいものの，供試体作製の手間や対応する強度試験装置の点で課題を有しており，さらに簡便な作製方法および試験方法を検討していく必要があると思われる。

(3) まとめ

本研究は，温度影響を考慮した引張強度特性を検討するために，簡易物性評価試験装置を用いてマス養生下での割裂引張強度特性および直接引張強度特性について検討を行い，温度影響を考慮した圧縮強度を介さない引張強度発現式の提案を行った。また，実構造物のコンクリート部材内部の応力状態をシミュレートした TSTM のひび割れ発生時応力と本研究で提案したひび割れ発生時の引張強度とを比較し，その適用性の可能性を見出すことができた。

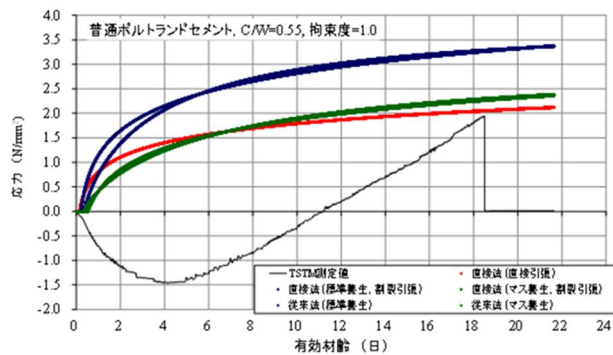


図 - 5 応力履歴と引張強度発現の比較

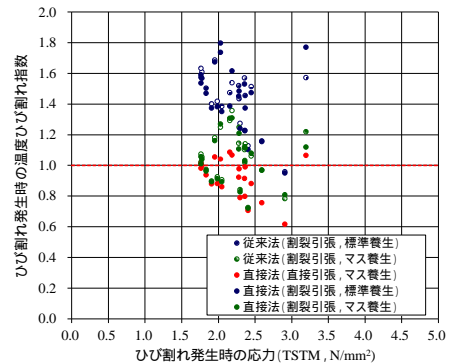


図 - 6 ひび割れ発生時の応力とひび割れ発生時の温度ひび割れ指数との関係

< 引用文献 >

新井 淳一，泉 宙希，芦澤 良一，溝淵 利明：マスコンクリート構造物における温度影響を考慮した引張強度特性 に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp. 329-334，2019.07

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Kayo Ohashi・Jun-ichi Arai・Toshiaki Mizobuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on estimation of creep behaviour of concrete at early age considering temperature effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Concrete Solutions2019	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 Ryoichi Ashizawa・Toshiaki Mizobuchi・Hiroki Izumi	4. 巻 -
2. 論文標題 STUDY ON VARIOUS FACTORS RELATED TO THE EVALUATION OF THERMAL CRACKING PROBABILITY OF MASS CONCRETE STRUCTURES	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 5th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies	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 新井 淳一・泉 宙希・芦澤 良一・溝渕 利明	4. 巻 41
2. 論文標題 マスコンクリート構造物における温度影響を考慮した引張強度特性 に関する一考察	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 329-334
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 泉宙希, 新井淳一, 持丸史弘, 溝渕利明	4. 巻 72
2. 論文標題 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの温度影響を考慮した諸特性に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 217-224
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 Toshiaki Mizobuchi・Kohsuke Ishizeki・Takahiro Sagawa・Tetsushi Kanda	4. 巻 Vol.17
2. 論文標題 Study on the influence of minor constituents in blast furnace slag rich cement on the thermal and mechanical properties of concrete	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 46-61
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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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