

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04299

研究課題名(和文) 遅延エトリンサイト生成によるコンクリートのひび割れメカニズムと構造性能の関連評価

研究課題名(英文) Cracking mechanism and structural performances of concrete damaged by delayed ettringite formation

研究代表者

松本 浩嗣 (Matsumoto, Koji)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10573660

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)：遅延エトリンサイト生成が発生したコンクリートのひび割れ発生メカニズムと、構造性能に与える影響を検討した。体積変化を考慮したメソスケール離散解析から、ペースト膨張に伴うひび割れは膨張ひずみの発生領域の影響を大きく受けることを明らかにした。また、模擬骨材を用いたリング型膨張試験から、界面膨張圧とペースト膨張の貢献度を検討した。構造性能に関しては、インド鉄道のPC枕木を例として、曲げ耐力、せん断耐力に及ぼす影響を実験的に明らかにし、遅延エトリンサイト生成の発生を考慮した耐力の計算方法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフラの老朽化に伴い、わが国のみならず、維持管理の合理化は世界的な課題である。遅延エトリンサイト生成は、比較的最近になって認知されてきたコンクリートの損傷形態であり、その発生メカニズムはいまだ不明な点が多い。本研究は、遅延エトリンサイト生成により発生するコンクリートのひび割れを力学的視点に基づいて検討したもので、世界的にも先駆的な結果を得ている。また、維持管理で重要となる構造性能に着目し、遅延エトリンサイト生成が曲げおよびせん断耐力に及ぼす影響を明らかにした。本研究成果は、世界中に膨大にあるコンクリート構造物に対する維持管理の合理化に資するものであり、大きな社会的意義を持っている。

研究成果の概要(英文)：Cracking mechanism of concrete damaged by delayed ettringite formation and its influence on the structural performance were investigated. Meso-scale discrete analyses considering volume changes revealed that expanded regions significantly affect cracking patterns caused by paste expansion. Contribution of interface expansive pressure and paste expansion was also investigated from ring type expansion tests using an artificial aggregate. As for the structural performances, the effect of delayed ettringite formation on flexural capacities and shear capacities of PC sleepers of Indian Railways were experimentally investigated as case examples. Furthermore, the calculation method for flexural capacity was considered.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 遅延エトリンサイト生成 膨張ひずみ 構造性能

1. 研究開始当初の背景

遅延エトリンサイト生成 (以下、DEF) は、比較的最近になって認知されるようになったコンクリートの損傷形態である。その事例や発生メカニズムに関する研究は主に欧州で 2000 年代になってから始まり、高温養生中に融解したエトリンサイトがコンクリート硬化後に再生成され、その膨張性によりひび割れが生じると言われている。このため、蒸気養生を行うプレキャスト製品や、水和熱の影響を大きく受けるマスコンクリートで DEF の発生事例が多く見つかっている。DEF で発生する膨張ひずみは非常に大きく、材料や環境条件にもよるが、 10000μ を超えるひずみを実験的に確認されている。これは一般的なコンクリートに圧縮破壊が生じるひずみの約 5 倍であり、材料特性や構造物の安全性への影響が懸念されている。

DEF で生じる膨張によりひび割れが発生するメカニズムについては、セメントペーストの膨張によるものとするペースト膨張説と、骨材-ペースト界面に析出するエトリンサイトが膨張圧を発生するとする界面結晶成長圧説がある。電子顕微鏡や成分分析等により様々な検討が行われているが、どちらの説が有力なのかは明らかになっていない。既設構造物の維持管理に対する社会的需要が高まっている昨今の状況に目を向けると、DEF に限らず、材料特性や構造物性能を把握し、長寿命化のための対策を検討することが極めて重要である。にもかかわらず、DEF に関するこれまでの研究は材料学的な視点のものがほとんどであり、コンクリートの力学特性や構造物の性能等、力学的な視点で整理した研究事例が極めて少ない。そのため、材料強度や部材の耐荷力、剛性等への影響については、ほぼ未解明の状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、DEF によるひび割れ発生メカニズムを力学的知見に基づき明らかにすることと、DEF が生じたコンクリートおよびコンクリート構造物の力学特性、構造物性能を明らかにすることである。

3. 研究の方法

ひび割れ発生メカニズムについては、メソスケール離散解析とリング型膨張試験により検討した。メソスケール離散解析には、コンクリートの破壊現象に対して実績がある剛体ばねモデル (以下、RBSM) を用いた。図 1 に示すように、粗骨材とモルタルを個別にモデル化し、剛体要素間に配したばねにより、力学挙動を再現した。DEF による膨張挙動を再現するため、ばねに初期ひずみを与えた。ここで、初期ひずみを与えるばねは、①モルタル部、②粗骨材-モルタル界面、の二種類とした。①は前出のペースト膨張説、②は界面結晶成長圧説に対応するものである。なお、②は骨材内部または表面に膨張生成物であるアルカリシリカゲルが析出するアルカリシリカ反応 (以下、ASR) の状況と酷似しているものと思われる。初期ひずみによる膨張挙動の

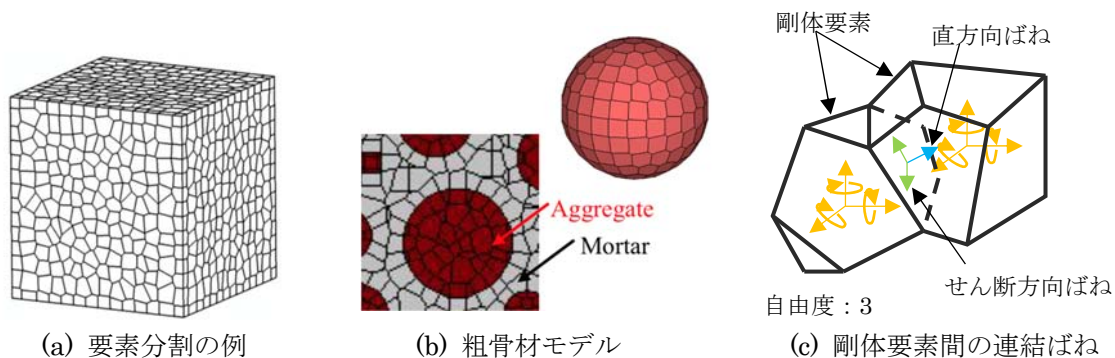


図 1 メソスケール離散解析(RBSM)の概要

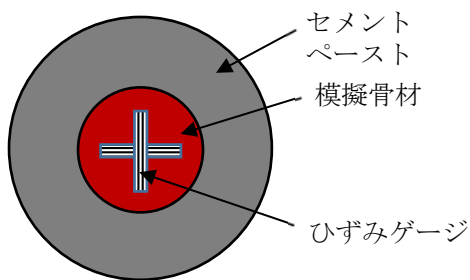


図 2 リング型膨張試験の概要



図 3 インド鉄道の損傷 PC マクラガ

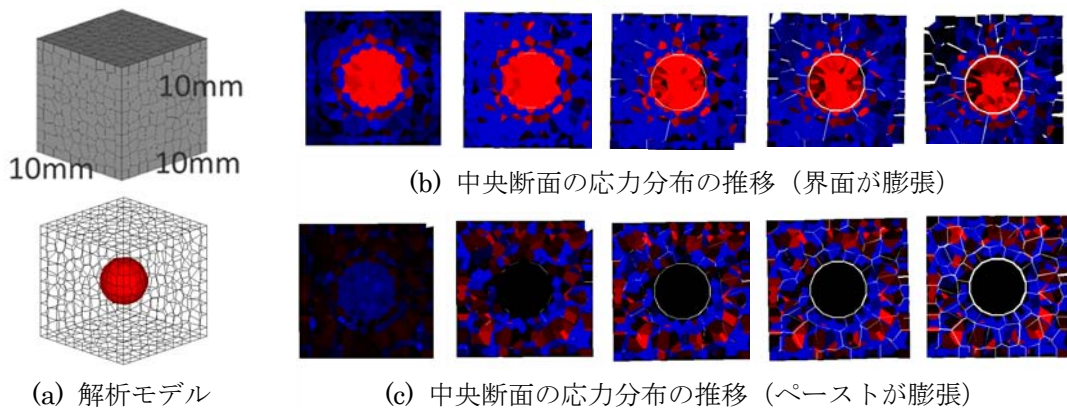


図4 RBSMによる膨張解析結果（単一骨材モデル）

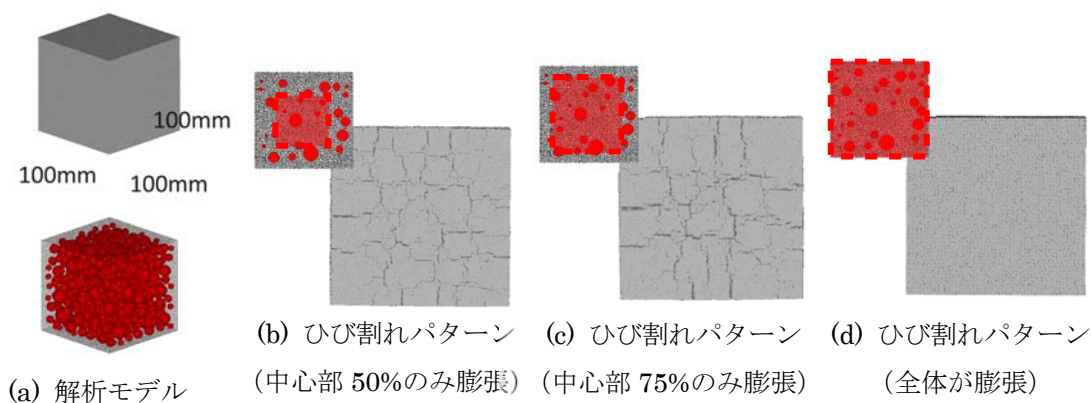


図5 RBSMによる膨張解析結果（複数骨材モデル）

再現後は、片面を固定，反対側の面に強制変位を与えることで，圧縮破壊シミュレーションを実施した。DEF発生後のコンクリートの力学性状を解析的に検討することが目的である。

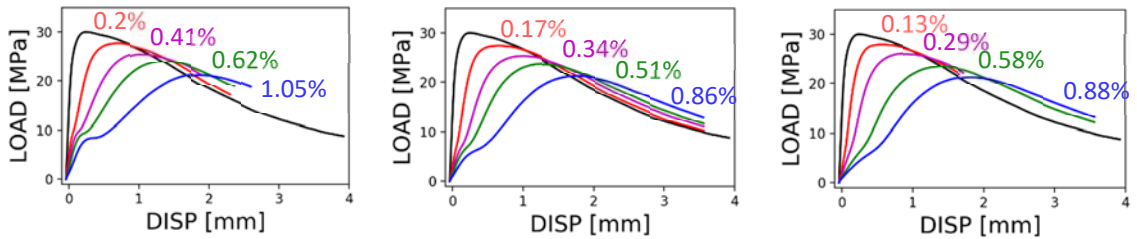
リング型膨張試験では，図2に示すように，模擬骨材を中央に配置し，その周囲に硫酸塩を含むセメントペーストをリング状に成型し，高温養生の後に水中養生を行った。模擬骨材のひずみを測定することで，膨張圧の発生位置，方向等を検討することが目的である。結晶成長圧説によれば，骨材-ペースト界面に膨張圧が作用するため，骨材には圧縮ひずみが発生すると考えられる。一方，ペースト膨張説では周囲のペースト部のみが膨張するため，界面が堅固に付着していれば，骨材には引張ひずみが生じると考えられる。実験パラメータは，模擬骨材の種類（アクリル，アルミニウム），界面の処理（ボルトの打ち込みの有無）とした。アクリルはセメントペーストよりも弾性係数が極めて小さく，比較的大きなひずみが模擬骨材に発生すると予想されたことから，明確な測定結果が得られることを期待したものである。一方，アルミニウムの弾性係数は一般的な骨材と近く，力学特性を模擬するために使用した。ボルトの打ち込みは，界面の接着性状を堅固なものにするために行った。セメントペーストと接する模擬骨材の側面に頭部を有するボルトを約半分まで打ち込み，その後，セメントペーストを成型した。ボルト頭部が機械式定着となることで，周囲のセメントペーストが膨張しても界面が引張破壊することなく力を伝達し，模擬骨材に引張ひずみが発生することを期待したものである。

構造性能については，インド鉄道のプレストレストコンクリート（以下，PC）マクラギを対象として，現地で採取したコアサンプルの分析とともに载荷実験を実施した。図3に示すように，インド鉄道では近年，ひび割れによる深刻な損傷がPCマクラギに見つかっている。蒸気養生を行ったプレキャスト製品であること，顕在化したのが供用開始から7～8年後であること，端部に膨張挙動特有の亀甲状のひび割れが認められたこと等から，DEFによる損傷が疑われたため，検討対象として選定した。

4. 研究成果

図4に，単一の骨材を中心に配置した最も単純なモデルについて，RBSMによる膨張解析の結果の一例を示す。応力分布は赤色が圧縮応力，青色が引張応力を表しており，図の右側になるにしたがって，大きな初期ひずみを与えている。①ペースト部が膨張したケース，②界面が膨張したケースを比較すると，骨材に発生する応力が異なることがわかる。前者はほとんど応力が生じないが，後者は顕著な圧縮応力が生じている。この結果は，リング型膨張試験において，膨張ひずみが発生する位置により模擬骨材に生じるひずみが異なるという前述の仮説と一致する。

図5に，複数の骨材を配置したモデルについて，RBSMによる膨張解析の結果の一例を示す。



(a) 中心部 50%のみ膨張 (b) 中心部 75%のみ膨張 (c) 全体が膨張

図 6 膨張解析後の圧縮破壊シミュレーション結果 (複数骨材モデル)

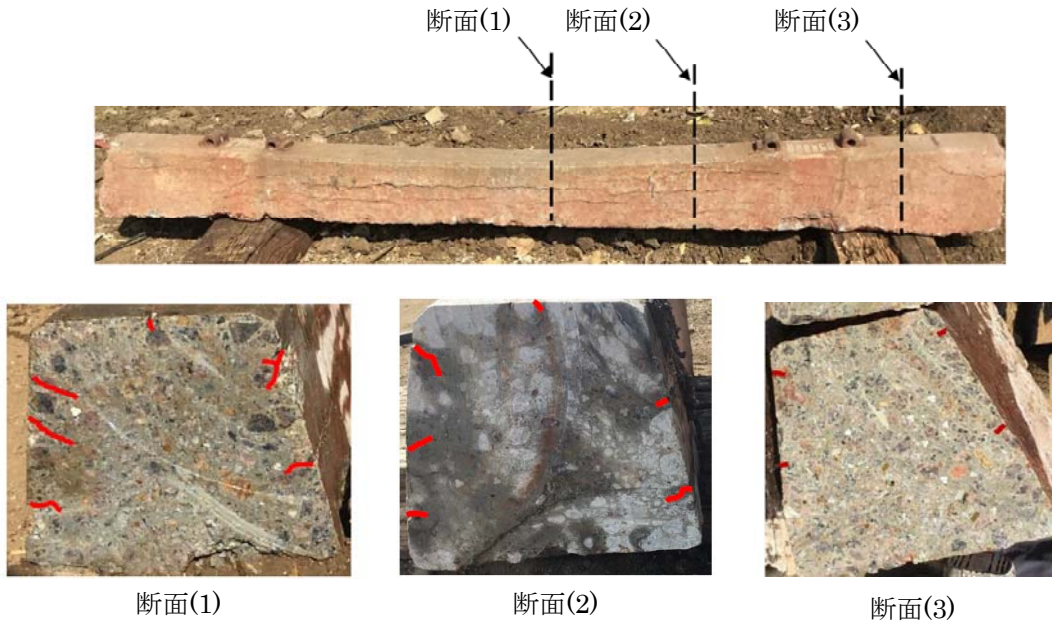
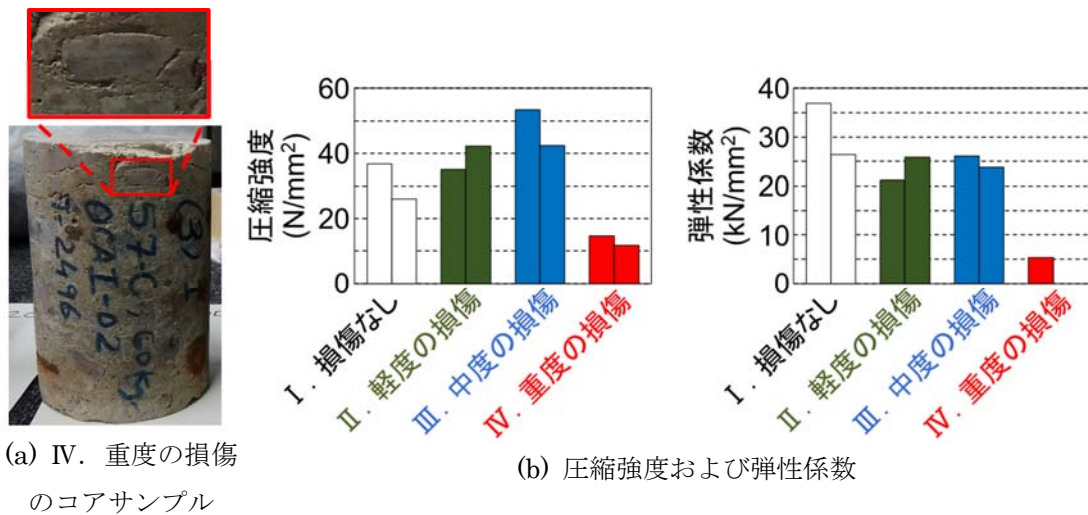


図 7 損傷 PC マクラギの切断面の様子



(a) IV. 重度の損傷
のコアサンプル

(b) 圧縮強度および弾性係数

図 8 コアサンプル状態と圧縮試験結果

前述したように、DEF は養生時の温度と、硬化後の水分量の影響を受けることが知られている。特に養生時の温度については、水和熱の影響で内部が高温になると考えられることから、DEF による膨張ひずみは内部で顕著に発生する可能性がある。そこで本検討では、初期ひずみを与える領域を変化させた。中心部の 50%のみ、75%のみに初期ひずみを与えたケースは、実際に DEF で発生するひび割れに近く、表面に亀甲状のひび割れが認められる。一方、全体に初期ひずみを与えたケースは、巨視的なひび割れは発生しなかった。すなわち、DEF の発生メカニズムをペースト膨張説とすれば、膨張ひずみの発生領域がひび割れ性状に大きく影響することがわかる。

図 6 に、膨張解析後の圧縮破壊シミュレーションで得た圧縮荷重-変形関係の一例を示す。図中の%は、圧縮荷重が作用する前に与えた平均膨張ひずみの大きさである。膨張ひずみが大きいほど、圧縮強度および弾性係数が減少することがわかる。興味深いのは、(c)全体が膨張するケ

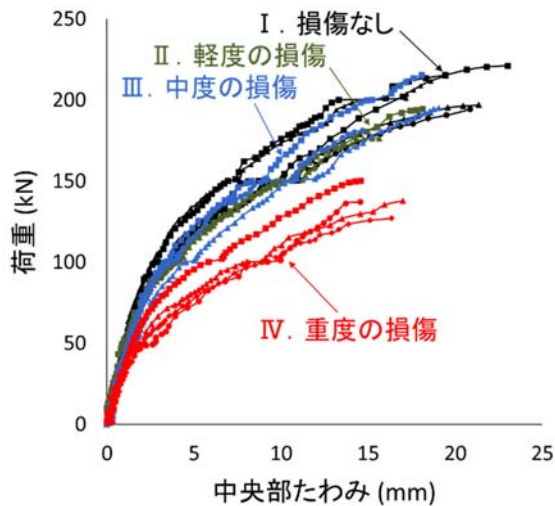


図9 PC マクラギの荷重-変位関係

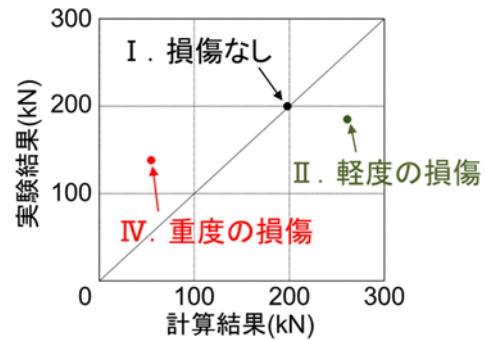


図10 曲げ耐力の計算値と実験値の比較

ースは図5に示したように表面に巨視的なひび割れが発生していないにもかかわらず、(a)および(b)と同様にコンクリートの力学特性が低下していることである。既設構造物を点検する際、表面に顕著なひび割れが確認されなくてもコンクリートの力学特性が低下している可能性があるということを示唆しており、適切な維持管理を実現するために極めて重要な情報になり得る。なお、本解析では、(a)、(b)、(c)ともに骨材-ペースト界面にギャップができる現象が確認されており、既往の知見と一致する。巨視的なひび割れがなくても、このような内部に生成されるギャップがコンクリートの力学特性に影響を与える可能性がある。

リング型膨張試験を実施した結果、セメントペーストが膨張することで、模擬骨材にひずみが生じることが確認された。ただし、実験結果のばらつきが大きく、圧縮ひずみ、引張ひずみの有無を含めて、本研究で検討した範囲では明確な傾向を得るには至らなかった。水中養生中のひずみ測定の様子等に検討の余地があると思われ、今後の検討課題としたい。

インド鉄道のPCマクラギについては、まず切断面を観察し、内部のひび割れ状況を確認した。図7に、切断面の例を示す。多くのケースで、内部のひび割れは中心に到達しておらず、その深さは20~30mm程度に留まっていた。これは損傷の程度によらず、表面のひび割れ幅が2mmを超える損傷が激しいものでも、内部のひび割れ深さは同程度であった。これは、DEFによる膨張が均一ではなく、内部のみに発生した可能性を示唆している。膨張ひずみが発生する内部は、周囲のコンクリートの拘束を受けて圧縮力が作用し、顕著なひび割れは生じない。一方、膨張しない外部は、内部からの膨張圧を受け、断面の周方向に引張応力が生じる。その結果、外部のみに顕著なひび割れが生じたと考えられることができる。この観察結果は、前述したメソスケール離散解析において、初期ひずみを内部の領域に限定的に与えたことの根拠として説明できるのである。

図8に、PCマクラギから採取したコアサンプルの圧縮試験結果を示す。図に示すように、重度の損傷が発生していたケースでは、骨材周囲にギャップが生成されていることを確認した。しかし、巨視的なひび割れは必ずしも発生しているわけではなかった。ここで、I、II、III、IVで分類した損傷度は、PCマクラギの表面に確認されたひび割れの本数と幅に基づき決定した。特に「IV. 重度の損傷」に関しては、圧縮強度、弾性係数ともに大きく低下していることがわかる。巨視的なひび割れを含まないサンプルでも同様の傾向があることから、骨材周囲のギャップ等の影響を顕著であることが示唆される。これは、メソスケール離散解析で得た知見と一致する。

図9に、PCマクラギの載荷実験で得た荷重-変位関係を示す。ここでは、曲げ破壊が生じたケースのみを載せている。「IV. 重度の損傷」のPCマクラギは、健全時よりも耐力が約35%低下しており、部材剛性も小さくなっていることが確認された。このことから、DEFは部材の力学性能に顕著に影響することがわかった。また、DEFが生じたPCマクラギの曲げ耐力の算定手法を検討した。曲げ耐力の算定には、PC棒部材の曲げ耐力を計算する手法として一般的な平面保持の仮定に基づき、コアサンプルの圧縮試験で得た圧縮強度の実測値を用いた。プレストレス量は実測が困難であったため、設計値を用いた。図10に、計算結果と実験結果の比較を示す。特に「IV. 重度の損傷」が生じたPCマクラギに対して、計算値は実験値を大きく過小評価する結果となった。その原因を特定するには至っていないが、ひとつの要因として、膨張によるプレストレス量の変動が挙げられる。計算ではプレストレス量に設計値を用いており、健全時に相当する値を仮定している。これは、「I. 損傷なし」の計算値と実験値が一致していることから、推察できる。一方、損傷を有するケースはDEFによる膨張ひずみが発生している。PCマクラギは内部にPCより線が部材軸方向に配置されており、コンクリートの膨張ひずみを拘束する。その結果、PCより線の引張力とコンクリートの圧縮力が増加するものと考えられる。本検討では定量的な評価を行うには至っていないが、このようなプレストレス量の変動が曲げ耐力に影響する可能性がある。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yi Wang, Yushi Meng, Punyawut Jiradilok, Koji Matsumoto, Kohei Nagai and Shingo Asamoto	4. 巻 Vol. 104
2. 論文標題 "Expansive Cracking and Compressive Failure Simulations of ASR and DEF Damaged Concrete Using a Mesoscale Discrete Model"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 なし
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 Rajamurugan Sundaram, Koji Matsumoto, Kohei Nagai and Anupam Awasthi	4. 巻 Vol. 4, No. 2
2. 論文標題 Visual Investigation Method and Structural Performance Evaluation for DEF Induced Damaged Indian Railway PC Sleepers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Asian Concrete Federation	6. 最初と最後の頁 103-115
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

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Koji Matsumoto, Kohei Nagai, Rajamurugan Sundaram and Anupam Awasthi
2. 発表標題 Cause Estimation and Proposal of Inspection Method for PC Sleepers of Indian Railways
3. 学会等名 17th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本浩嗣, Rajamurugan Sundaram, 長井宏平, Anupam Awasthi
2. 発表標題 インド鉄道・損傷 PC マクラギの構造性能評価と外観目視点検手法
3. 学会等名 既設コンクリートの構造性能評価に関するシンポジウム
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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