

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709032

研究課題名(和文)塩害環境下で疲労を受けるRC構造物に対する耐久性評価手法の開発

研究課題名(英文)Development of evaluation method for durability of RC structures subjected to fatigue loading in chloride environment

研究代表者

松本 浩嗣(Matsumoto, Koji)

東京大学・生産技術研究所・講師

研究者番号：10573660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：塩害環境下で疲労を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価を可能とすることを旨として、剛体ばねモデルによる構造解析と物質移動解析を連成した数値シミュレーションを開発した。従来の二次元解析を三次元解析に拡張し、物質移動を再現するためのトラスネットワークモデルを実装した。また、鉄筋表面の要素に初期ひずみを付与するシステムを新たに開発し、腐食による体積膨張に伴うひび割れ進展をシミュレーション可能なものにした。電食試験により鉄筋に腐食を導入した模擬試験体の引抜き載荷実験を併せて実施し、本研究で開発した数値解析システムが実験結果を良好に再現可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation system, in which the structural analysis and mass transfer analysis are combined, was developed to evaluate the durability of reinforced concrete structures subjected to fatigue loading in chloride environment. The existing two-dimensional analysis system was extended to three-dimensional analysis system and the truss network model was implemented to simulate the mass transfer behavior. In addition, the system which enables to simulate cracking behavior due to volume expansion of steel corrosion by introducing initial strains at the surface of steel reinforcement was newly developed. Pull-out loading tests of the specimens with steel corrosion induced by the electric corrosion test were also conducted in this research. The test data confirms the validity of the developed analysis system.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：疲労 鉄筋腐食 物質移動 剛体ばねモデル

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物は、鋼構造物と並んで、多くのインフラに使用されている代表的な構造形式である。コンクリートは圧縮力には強いが引張力に弱いという特徴を有しているため、構造材料として単独で使われることは極めて稀である。多くのコンクリート構造物には、補強材として鋼材が使われており、その代表的な例が、引張部を鉄筋で補強した鉄筋コンクリート（以下、RC）構造である。わが国では、1960年代から1970年代にかけての高度経済成長期に多くのインフラが建設され、現在、建設後50年を超える構造物の割合が急増している。インフラの老朽化は、人命や経済的損失にかかわる極めて重大な社会問題である。

鉄筋腐食は、RC構造物の代表的な劣化形態である。その要因のひとつは、沿岸部における塩分飛来や寒冷地における融雪剤の散布などの塩害環境下で、コンクリート表面から塩化物イオン等の劣化因子が浸透し、内部の鉄筋の腐食反応を引き起こすことである。特徴として、鉄筋断面の減少に伴う耐力の低下が比較的顕著に生じ、安全性への影響が懸念されること、塩害環境はわが国のみならず、世界中に存在することから、多くの劣化事例が過去あるいは未来に存在し、社会的インパクトが大きいことなどが挙げられる。

劣化した構造物に対する維持管理の基本は、劣化予測・点検・評価・対策のサイクルを実行することにある。特に、限られた予算、人員の中で、効率的に維持管理を行うためには、精度の良い劣化予測を実施し、将来の劣化状況に応じて適切な対策を選択し、予算配分を行うことが重要である。数値解析を活用したシミュレーション技術は、劣化予測と構造的な性能評価を実施するにあたって、極めて有効なツールである。大型の構造物が多いインフラ施設は、実物大の試験体を用いた実験が困難であるし、50～100年という長期的な挙動を実験室で正確に再現することは困難である。数値解析によるシミュレーションは、これらの問題点を解決できる可能性を秘めている。

RC構造物の数値シミュレーションに用いる解析手法としては、有限要素法（以下、FEM）が最も一般的である。対象物を有限の要素に分割し、節点の力と変位の関係を、応力-ひずみ関係を構成則として解く手法である。ひび割れの表現手法として「分散ひび割れモデル」と「離散ひび割れモデル」が存在するが、「離散ひび割れモデル」はひび割れ発生位置にあらかじめひび割れ要素を設定しなければならないが、ひび割れ位置が未知のケースに対応できないため、「分散ひび割れモデル」の方が一般的である。「分散ひび割れモデル」では、ひび割れは要素内に均一に発生するものと捉えられ、ひび割れの拡幅・すべりによる変形は、要素内のひずみとして平均的に評価される。従来のRC構造物に対する数値シミュレーションでは、分散ひび割れモデルを

用いたFEMが多く用いられ、曲げ、せん断などの力学挙動が再現されてきた。

しかしながら、FEMを鉄筋腐食が生じるRC構造物に適用しようとする、いくつかの問題点がある。具体的には、以下の事項である。

- ① ひび割れ位置での局所的な腐食進展を再現できない。実際の構造物では、ひび割れが発生すると、劣化物質がひび割れを通して浸透するため、ひび割れ位置の鉄筋に局所的に腐食が進行する。FEMに使われている分散ひび割れモデルは、ひび割れを要素内で平均的に取り扱うため、ひび割れ位置における局所的な腐食進展を再現することができない。
- ② 腐食ひび割れを再現することができない。腐食ひび割れは、腐食による鉄筋の体積膨張により生じる、鉄筋に沿ったひび割れであり、構造的な性能やその後の劣化進展に多く影響する。FEMでは、鉄筋の表現方法として「分散鉄筋モデル」と「離散鉄筋モデル」の二つがあるが、どちらのモデルに関しても、鉄筋の軸外方向への膨張を表現可能な手法が存在しないためである。

これらを解決するため、従来のFEMに代わる、新しい解析手法の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

離散解析手法を用いた微細構造解析に物質移動モデルを組み込み、ひび割れ位置での局所的な腐食進展を含めて、鉄筋の腐食プロセスを再現可能で、かつ構造的な性能を評価可能な数値解析技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

離散解析手法のひとつである剛体ばねモデルを用いて、開発を実施した。

まず、従来の二次元解析システムを三次元解析に拡張した。その理由は、鉄筋の腐食プロセスは、劣化因子の三次元的な移動現象に大

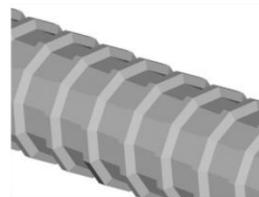


図1 異形鉄筋モデル

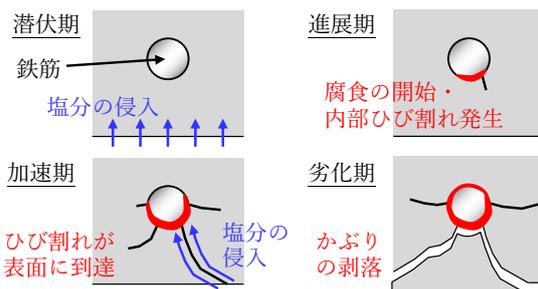


図2 鉄筋の腐食過程

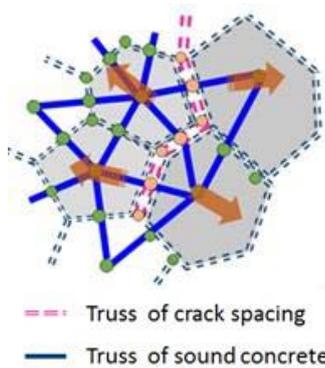


図3 トラスネットワークモデル

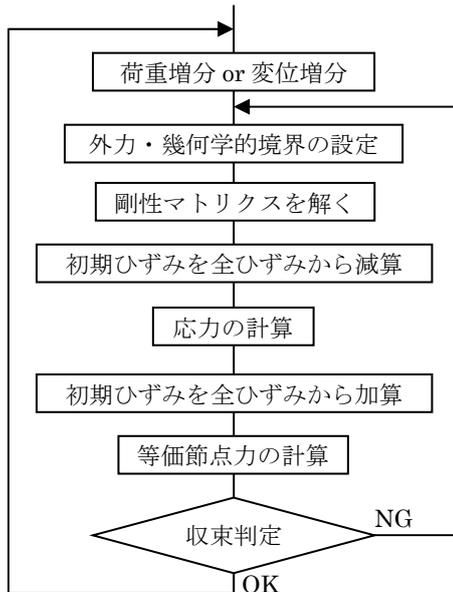


図4 初期ひずみ解析のフロー

大きく左右されること、また、それに伴い発生する腐食ひび割れは三次元的な分布を呈しており、二次元解析では再現性に限界があると判断されたためである。

次に、異形鉄筋の三次元モデルを導入した。本研究で開発した解析手法は微細構造解析であり、従来の解析モデルとはスケールが異なる。従来、鉄筋は線材要素でモデル化されてきたが（離散鉄筋モデルの場合）、本研究では、異形鉄筋そのものを複数のソリッド要素で構成し、フシ形状を含めてモデル化した（図1）。このモデル化のメリットは、異形鉄筋の付着・すべりにより発生する力を三次元的に再現可能なことにある。すなわち、異形鉄筋の付着・すべり挙動は、構成則としてあらかじめ用意されるのではなく、コンクリートからフシに作用する抵抗力から逐次算出され、鉄筋の軸方向だけでなく、軸外方向に生じる抵抗成分も解析結果として得ることができる。本手法により、たとえば腐食ひび割れにより、かぶりコンクリートの拘束効果が低下した場合の異形鉄筋の付着挙動を、正しく再現できるのである。

コンクリート中の鉄筋の腐食プロセスは、コンクリートおよびひび割れ中の物質浸透挙



図5 電食試験の様子

動に大きく左右される（図2）。本研究では、これを再現するため、トラスネットワークモデルを導入した。物質の浸透を再現するトラス要素には二種類あり、剛体要素内に配置されたコンクリート中の浸透性状を再現する要素と、剛体要素間の界面に配置されたひび割れ中の浸透性状を再現する要素である（図3）。トラス要素の構成則は Fick の拡散方程式に基づくものである。拡散係数は、剛体要素内のトラス要素は、ひび割れていないコンクリートの物質浸透試験結果から定めた。剛体要素間の界面のトラス要素の拡散係数は、ひび割れを導入したコンクリートの物質浸透試験結果から定め、ひび割れ幅に応じて変化するものとした。

腐食により鉄筋周囲に発生する内圧を再現するため、初期ひずみを用いた膨張解析システムを構築した。なお、本解析システムは鉄筋の膨張挙動だけでなく、コンクリートの膨張あるいは収縮挙動を再現することもできる。将来的には、コンクリートの収縮や凍結融解、アルカリ骨材反応などの劣化に対しても、応用可能である。初期ひずみ解析のフローを図4に示す。本手法は非線形求解法との組み合わせによるものであり、該当するばね要素の応力を算出する前後で、初期ひずみ相当分のひずみを減算・加算し、力の釣り合い関係が成立する全ひずみを非線形求解法により求めることにより、周囲の拘束条件に応じた膨張・収縮ひずみの算出を可能としたものである。

解析結果の妥当性を検討するため、コンクリート中の鉄筋が腐食した模擬試験体を作製し、引抜き载荷実験を実施した。鉄筋の腐食は、電食試験により導入した。試験体を塩水に浸漬し、鉄筋、塩水中に設置したステンレス板を供給電源の正極、負極にそれぞれ接続し、電流を負荷した。腐食量は積算電流量により管理し、質量減少率 20%を目標に電食試験を実施した。電食試験の様子を図5に示す。電食試験後は、油圧ジャッキを用いた引抜き载荷実験を実施した。

#### 4. 研究成果

(1) 三次元剛体ばねモデルによる RC の破壊シミュレーション  
 拡張した三次元解析システムの有用性を確認するため、RC の破壊シミュレーションを実

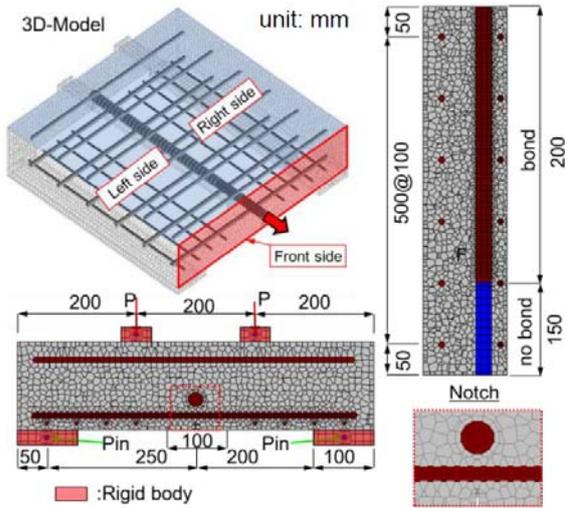
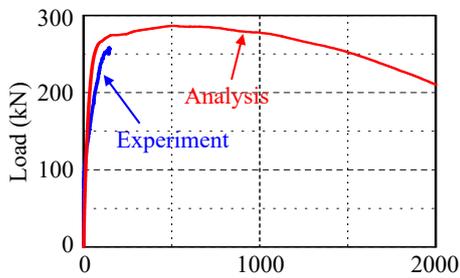
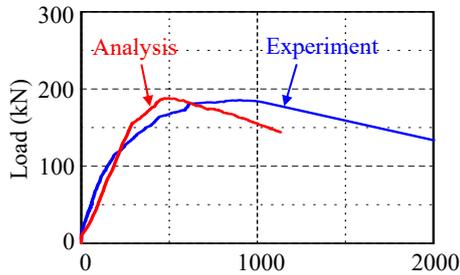


図6 初期ひび割れを有するRCの解析モデル



a) 初期ひび割れなし

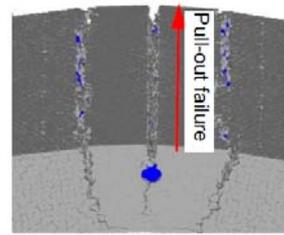


b) 初期ひび割れ幅=1.6mm

図7 解析で得られた引抜き荷重-変位関係の一例(初期ひび割れの影響)

施した。鉄筋腐食で問題となる、ひび割れ発生後の付着・引抜き性状を主な対象とした。解析を実施した代表的なモデルを図6に示す。解析は2つのプロセスで構成され、まず単純支持による3点曲げ荷重により鉄筋軸方向にひび割れを導入し、次に鉄筋の引抜き方向に強制変位を与えて、引抜き破壊を再現した。解析で得られた引抜き荷重-すべり変位関係の一例を図7に示す。鉄筋軸方向に導入したひび割れの幅に応じて、引抜き耐力が低下することが再現され、実験結果とほぼ一致した。図8に、破壊時のひび割れ、変形状を示す。実験で観察された破壊性状を、解析で良好に再現することができた。

## (2) ひび割れたコンクリート中の塩分浸透シミュレーション



a) 解析結果



b) 実験結果

図8 破壊時のひび割れ、変形状

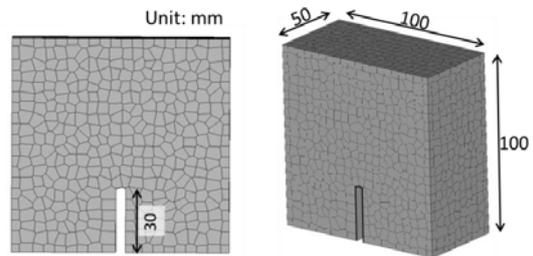


図9 塩化物イオン浸透解析に用いた解析モデル

導入したトラスネットワークモデルによる物質移動解析の妥当性を検証するため、ひび割れたコンクリート中の塩分浸透シミュレーションを実施し、実験結果と比較した。図9に、対象とした解析モデルを示す。プレ荷重によりひび割れを導入した後、表面の塩化物イオン濃度を境界条件として与え、時間の経過に伴う塩分浸透をトラスネットワークモデルにより解析した。

解析結果の一例を図10に示す。図には、既往の研究で得られた実験結果も併せて示している。解析で得られた塩分浸透性状は実験結果と良好に一致しており、本解析モデルの妥当性を確認することができた。

## (3) 腐食ひび割れ進展シミュレーション

導入した初期ひずみによる膨張解析システムの妥当性を検証するため、鉄筋腐食によるひび割れ進展シミュレーションを実施し、実験結果と比較した。図11に、対象とした解析モデルを示す。初期ひずみは、鉄筋要素とコンクリート要素の界面に与えた。

解析結果の一例を図12に示す。腐食により発生する鉄筋周囲の膨張応力により、コンクリート中にひび割れが進展する様子が再現されている。実験結果と比較すると、かぶり厚に応じてひび割れパターンが変化する挙動を良好に捉えられていることがわかる。

## (4) 腐食鉄筋の引抜き性状の検討

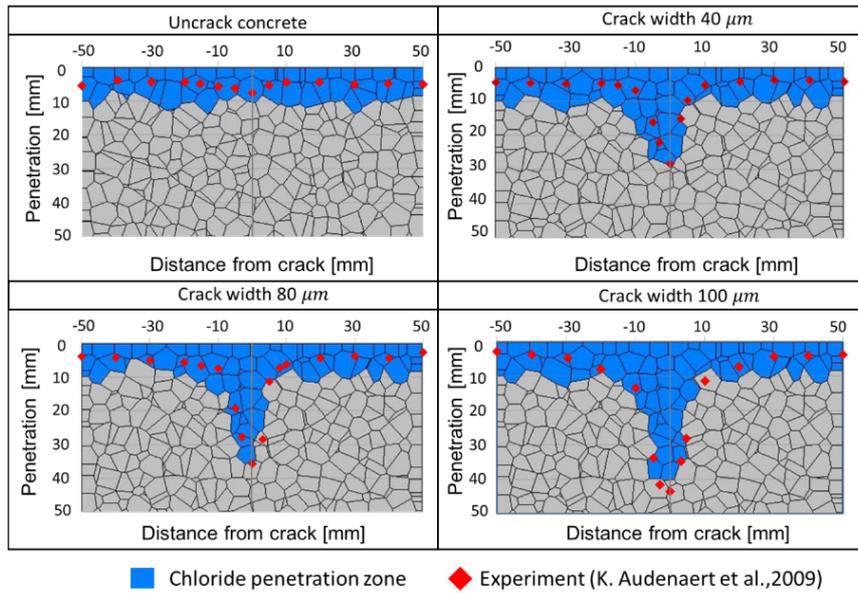


図 10 塩化物イオン浸透解析の結果の一例

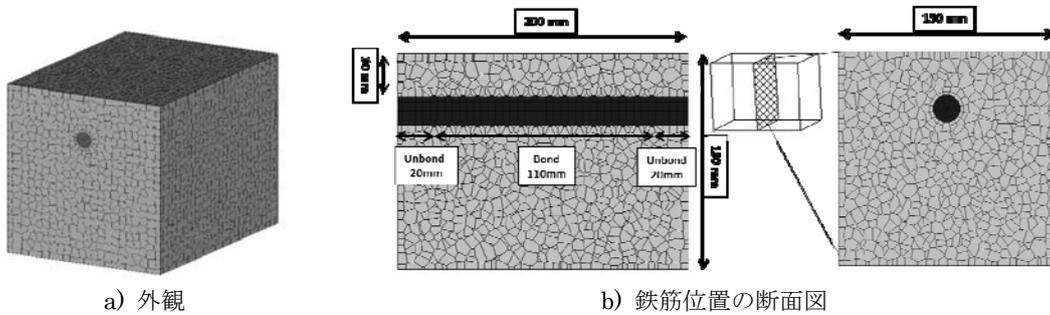


図 11 腐食ひび割れ進展および引抜き荷重シミュレーションに用いた解析モデル

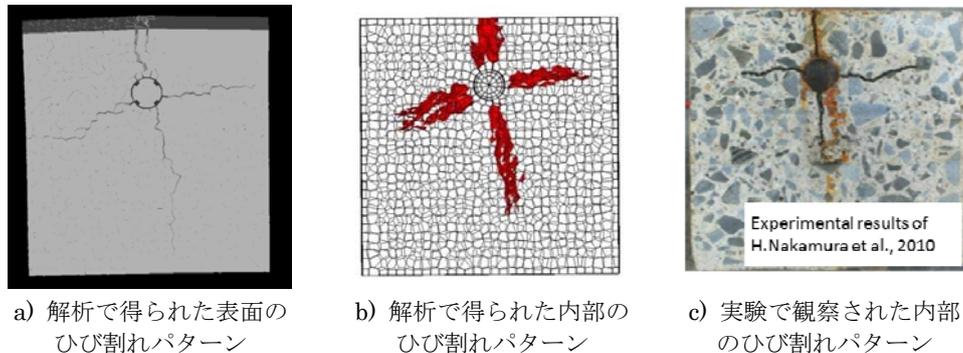


図 12 腐食ひび割れ進展シミュレーションの結果の一例

(3)で腐食による初期ひずみを与えた解析モデルに対して、引抜き破壊シミュレーションを実施した。得られた引抜き荷重-すべり変位と破壊時の様子を図 13、図 14 にそれぞれ示す。引抜き荷重-すべり変位関係に着目すると、導入した初期ひずみが大きいほど、すべり変位が卓越し、引抜き耐力が低下することが再現された。

図 15 に、実験で得た引抜き荷重-すべり変位関係を示す。引抜き耐力は、解析で得られた予測値よりも小さい値となった。これは、解析モデルでは腐食の影響を膨張ひずみのみで表しているが、実際にはフシ形状の消失

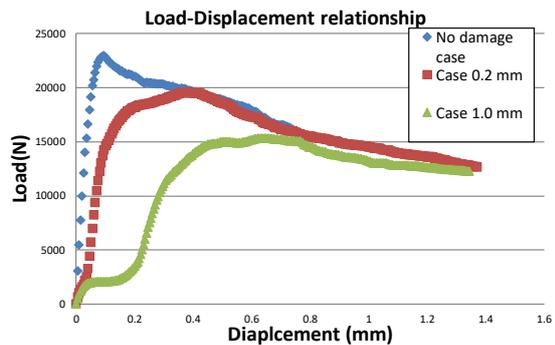


図 13 引抜き破壊シミュレーションで得られた引抜き荷重-すべり変位関係

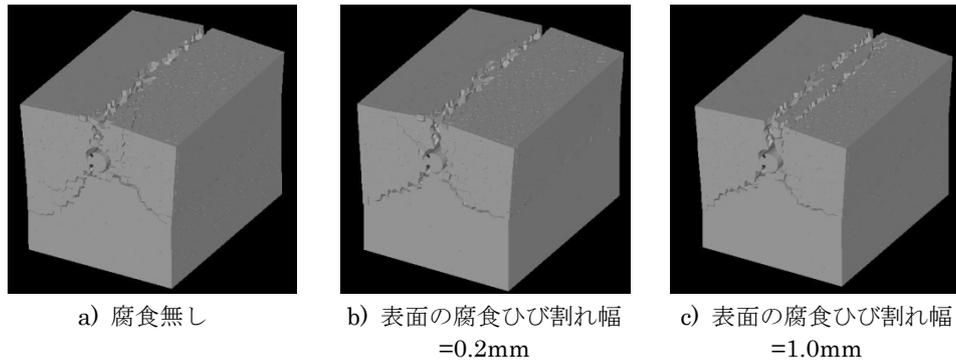


図 14 腐食ひび割れを有する異形鉄筋の引抜き破壊シミュレーション結果

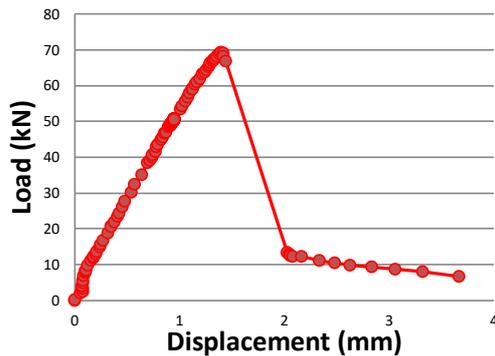


図 15 実験で得られた引抜き荷重—すべり関係

による機械的付着作用の低下が生じているためと考えられる。機械的付着作用の低下をいかにモデル化するかについては、今後の検討課題である。

以上のように、数値解析を活用した、力学的作用と環境作用を同時に受ける RC 構造物に対する評価技術について、基本的なスキームを本研究で確立することができた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Koji Matsumoto, Tao Wang, Daisuke Hayashi and Kohei Nagai, Investigation on the Pull-out Behavior of Deformed Bars in Cracked Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 14, 2016, 573-589.

[学会発表] (計 2 件)

- ① Punyawut Jiradilok and Kohei Nagai, Chloride Ion Penetration Simulation in Cracked Concrete based on Truss Network and RBSM, 7th Asia Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, University of Malaya, Malaysia, 2015.
- ② Punyawut Jiradilok, Kohei Nagai, Koji

Matsumoto and Liyanto Eddy, Three-dimensional Simulation of Cracking in Concrete due to Corrosion of Rebars by RBSM, The 7th Conference of Asian Concrete Federation, JW Marriott Hotel, Hanoi, Vietnam, 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 浩嗣 (MATSUMOTO, Koji)  
 東京大学・生産技術研究所・特任講師  
 研究者番号：10573660