

腐食による付着劣化を考慮したPC部材の構造性能評価解析

| | | | |
|----------|-----|---------|--------|
| 名古屋大学大学院 | | 学士 (工学) | ○渡辺 勇輝 |
| 名古屋大学大学院 | 正会員 | 博士 (工学) | 中村 光 |
| 名古屋大学大学院 | | 博士 (工学) | 三浦 泰人 |
| 名古屋大学大学院 | | 博士 (工学) | 山本 佳士 |

Abstract: In this study, the numerical simulation that reconstruct both corrosion-induced crack and bond deterioration with beam element for rebar by using 3D-RBSM was developed. The proposed analysis was applied to PC uniaxial member and PC beam member to validate the accuracy of it and the influence of rebar corrosion on mechanical behaviors of members. As a results, it was confirmed that the manifestation and propagation of crack due to rebar corrosion and the reduction of bending cracking load and stiffness can be calculated by proposed analysis. Therefore, this analysis has a possibility that it can accurately simulate the corrosion-induced crack distribution and ultimate state of PC structures by considering the change of mechanical property of rebar.

Key words : Bond Deterioration, Corrosion, Prestressed Concrete Members

1. はじめに

PC鋼材が腐食した際のPC梁の耐荷特性に着目した研究¹⁾や鋼材腐食を考慮した構造解析²⁾に関する研究は広く行われている。鋼材腐食が生じている部材の実挙動を忠実に再現するためには、鋼材腐食による膨張をモデル化し、腐食ひび割れの再現を行い、腐食による鋼材の力学的特性と付着特性の変化を考慮した上で荷重載荷解析を行う必要がある。しかし、腐食による膨張によって生じたひび割れを再現するには、一般に3次元的な鋼材のモデル化が行われ、荷重載荷解析まで行うには多大な計算コストがかかる。さらに付着劣化までを考えると、節のモデル化まで多くの場合で必要となり³⁾、部材解析を行うには現状のコンピュータ環境では非現実的である。また、計算コストを低減するために腐食による鋼材の力学特性の変化や、付着低下を直接取り入れた解析も行われるが、腐食過程や腐食ひび割れとの相互作用はその場合考えることができない。

このような現状に対し、著者らは腐食ひび割れ進展解析と部材の構造解析を少ない計算コストで実施することを目的として、コンクリートを3次元剛体バネモデル、鋼材をはり要素でモデル化し、鋼材腐食によるひび割れとそれに伴う付着劣化を自動的に考慮できる解析手法を開発した⁴⁾。もしこの手法でPC部材の破壊挙動を追跡することができれば、実現象を適切に考慮した実橋などの大規模な構造物の解析も可能になる。

そこで本研究では、著者らが開発した手法によって、鋼材腐食した場合のPC部材の付着特性、PCはりの曲げ特性の変化について検討した。なお、腐食率が大きくなった場合、鋼材の断面欠損による力学的特性の低下や、PC鋼材の破断の可能性も考慮する必要があるが、本研究では腐食ひび割れによる付着劣化のみを力学特性の低下の対象とした。

2. 解析手法の概要

著者らはコンクリートを3次元剛体バネモデル(RBSM)、鋼材をはり要素でモデル化し、鋼材を3次元でモデル化することなく鋼材腐食によるひび割れ進展を概ね妥当に再現できる解析手法を開発した⁴⁾。

ここではその解析手法の概要と付着に関わるモデル、プレストレスの導入方法について説明する。

2.1 コンクリートモデル

コンクリートは図-1に示すように、ボロノイ分割を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSMによりモデル化した。3次元RBSMはさまざまな部材で適用性が示されており、部材の全体挙動だけでなく、ひび割れの進展、局所位置での応力なども精度良く評価できることが確認されている。構成則などの詳細は参考文献⁵⁾を参照していただきたい。

2.2 鋼材と付着モデル

鋼材は図-1に示すように、はり要素を用いて離散的にモデル化し、はり要素の節点を長さ0であるリンク要素を用いてコンクリート要素に結合するようにしてモデル化した。リンク要素の鋼材軸に沿った方向のバネが、コンクリート要素と鋼材要素間の付着による荷重伝達を担う。リンク要素の鋼材軸に沿った方向のバネに考慮する付着応力-すべり関係を図-2に示す。本モデルは最大付着強度時までは図中に示す関数を、強度時以降は、応力が線形で低下し、そののち一定値となるものである。

2.3 仮想腐食膨張領域を仮定した腐食ひび割れ解析

腐食によるひび割れ進展を再現するためには、ひび割れのパターン、ひび割れ幅、かぶり厚さ、鋼材直径、鋼材の局所的腐食による膨張圧などが影響するため、実際の鋼材の断面積のモデル化が重要である。しかしながら、本手法の鋼材のモデル化に使用するはり要素は、実面積を有していない。そのため、著者らは図-3に示す仮想腐食膨張領域を仮定した腐食ひび割れ解析⁶⁾を提案した。本解析の特徴は、腐食量によって決定される腐食膨張圧から初期ひずみを計算し、その値を仮想腐食膨張領域内のコンクリート要素の境界面に設置されている垂直バネに導入する。これによって腐食時にコンクリート要素内に鋼材と同じ面積分の仮想の領域が生成されることである。この境界面に設置されている垂直バネには、コンクリートの剛性が与えられている。また、仮想腐食膨張

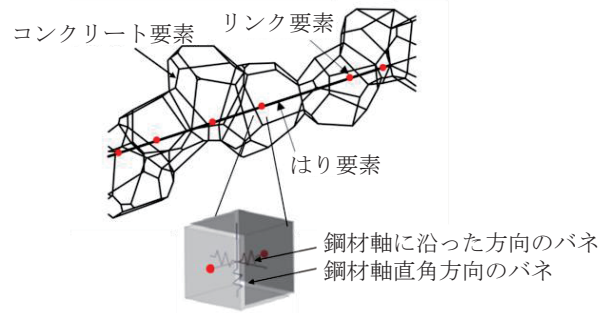


図-1 3次元RBSM とはり要素

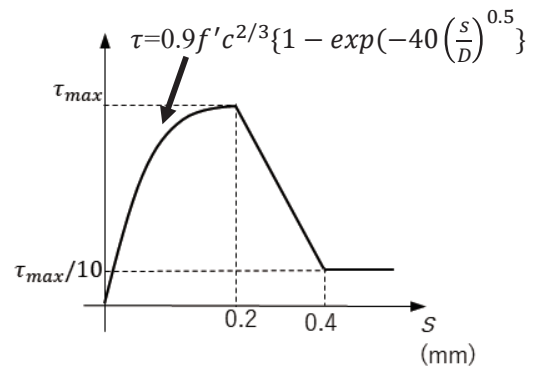


図-2 付着応力-すべり関係

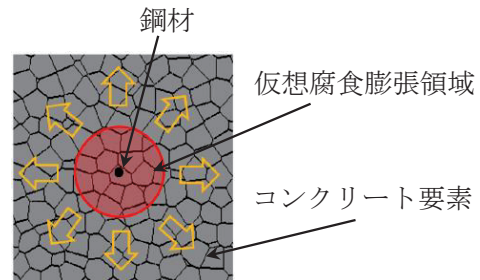


図-3 仮想腐食膨張領域

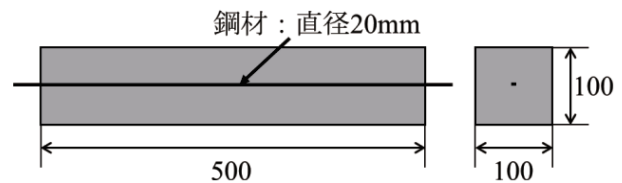


図-4 供試体諸元

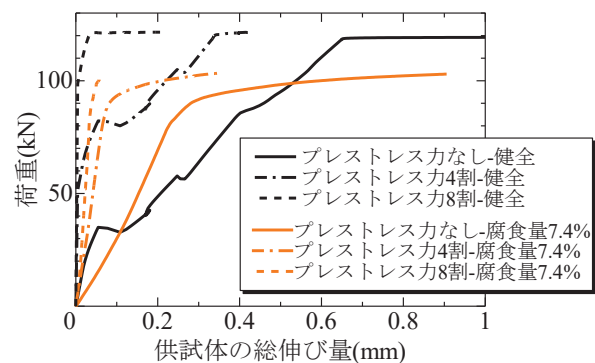


図-5 荷重-供試体の総伸び量関係

領域以外の特徴としては、腐食膨張圧の鋼材周方向の分布や、腐食生成物のひび割れ面への移動による膨張圧の低減などが挙げられる。これらの詳細な計算方法は参考文献⁶⁾を参照していただきたい。

2.4 プレストレス力の導入

プレストレス力の導入方法は、目標とするプレストレス力に相当する応力を、対象としているPC鋼材部分のはり要素に初期応力として導入した。

3. PC一軸部材の付着解析

3.1 解析対象

Shangら⁷⁾によって行われた比較的長いRC一軸部材に腐食ひび割れを発生させ、一軸荷重により腐食後のひび割れ分散性を検討した実験の供試体の長さを1/2にした諸元のPC一軸部材を仮定し、解析対象とした。供試体の諸元を図-4に示す。対象とした供試体は、長さ500mmで100×100mmの断面を有し、断面に直径20mm、降伏応力376N/mm²の鋼材1本が設置されている。解析はプレストレス力の影響を検討するため、鋼材の降伏応力の4割と8割の大きさの初期応力を鋼材に与え、プレストレス力の違いによる影響について検討した。本解析に用いた解析モデルの要素寸法は、仮想腐食膨張領域内や断面内にある程度の要素を含むよう10mmとし、はり要素は鋼材の中心位置に配置するようにモデル化した。また、今回、断面中央に鋼材が配置されており、かぶり厚さが均一であるため、腐食膨張圧は鋼材全方向に様にかかるものとし、腐食生成物の移動による膨張圧の減少は考慮していない。なお、ShangらのRC一軸部材を対象とした解析⁴⁾は、今回用いる手法によって行っており、実験と解析結果の妥当性は確認されている。

3.2 健全なPC一軸部材の付着解析

図-5の実線に健全供試体におけるプレストレス力を与えていない供試体、鋼材の降伏応力の4割、8割のプレストレス力を与えた供試体の荷重-供試体の総伸び量関係を実線で示す。今回、供試体両端部のコンクリート要素の鋼材軸方向の変位差を供試体の総伸び量とした。また、図-6に鋼材降伏時の表面ひび割れ展開図を示す。図-5に示す荷重-供試体の総伸び量関係では、プレストレス力が大きくなると、同じ荷重レベルでの総伸び量が小さくなる事が分かる。また図-6に示す表面ひび割れ展開図では、プレストレス力が大きいほど一軸荷重による鋼材軸直角方向のひび割れ本数が少なくなることが示された。

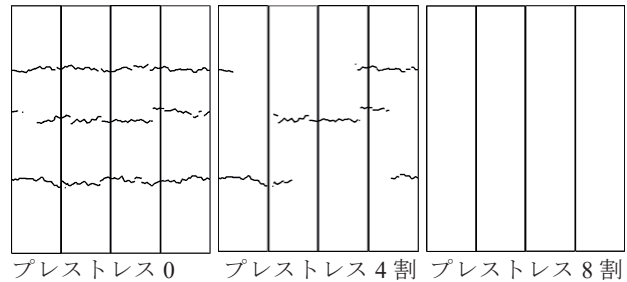


図-6 鋼材降伏時の表面ひび割れ展開図

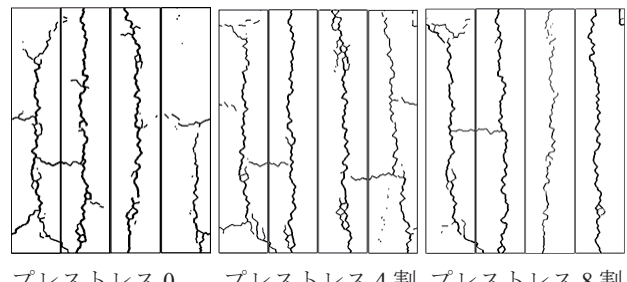


図-7 鋼材腐食時の表面ひび割れ展開図

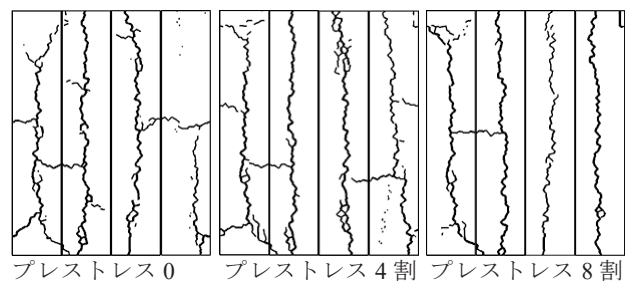


図-8 鋼材腐食+降伏時の表面ひび割れ展開図

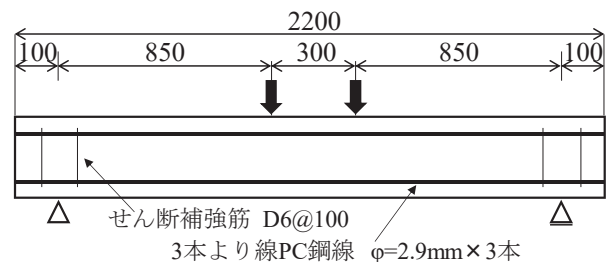


図-9 供試体諸元

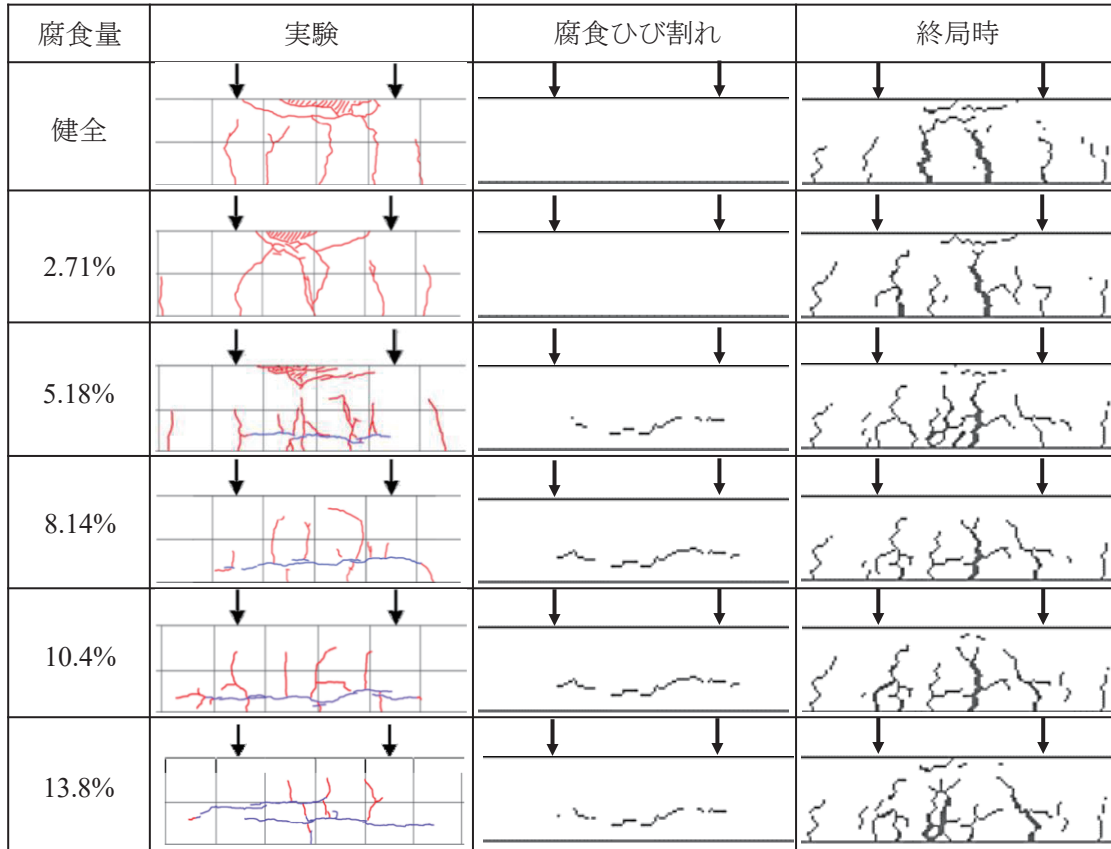


図-10 ひび割れ進展状況

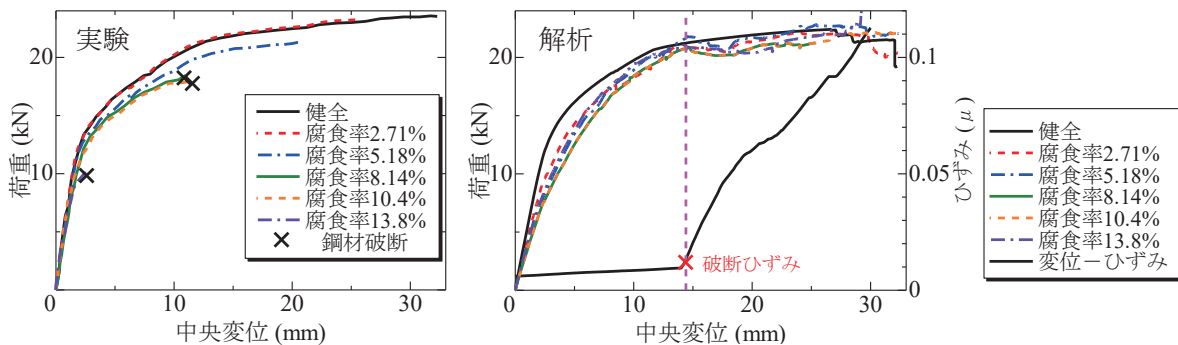


図-11 荷重-中央変位関係

3.3 鋼材腐食がPC部材の一軸載荷試験に及ぼす影響

鋼材を7.4%まで腐食させ、そののち引張荷重を与え、鋼材腐食とプレストレス力が部材挙動に及ぼす影響を検討した。図-5に荷重-供試体の総伸び量関係を破線で示す。腐食が生じている場合でも健全の供試体と同様、プレストレス力が大きいほど同じ荷重レベルでの総伸び量は、小さくなること示された。鋼材腐食によって腐食ひび割れが発生していても、導入されたプレストレス力の効果が継続される。図-7に腐食終了時、図-8に鋼材降伏時における表面ひび割れ展開図を示す。鋼材腐食した場合、プレストレスを与えていない供試体の一部の腐食ひび割れは、鋼材軸直角方向にも進展していたが、プレストレスが大きくなるにつれ、その方向のひび割れは抑制され、鋼材軸方向のひび割れが支配的となることが示された。また、鋼材降伏時には腐食ひび割れによる付着力の低下により、載荷試験によって生じる鋼材軸直角方向の新たなひび割れの発生は非常に少なく、またプレストレス力の違いの影響も少ないものであった。

4. 鋼材腐食が生じたPCはりの曲げ解析

4.1 解析対象

陸ら⁸⁾によって行われた、プレテンションPCはり試験体の腐食劣化促進試験を行ったのち、荷重試験により緊張材の腐食劣化と部材の構造性能の低下についての関係性を検討した実験を解析対象とした。供試体の諸元を図-9に示す。対象とした供試体は、断面が100×150mm、長さが2200mm、等曲げ区間長が300mmであり、軸方向にPC鋼より線Φ2.9-3本よりを緊張材として用い、支点部にはせん断補強筋D6が配置されている。鋼材腐食は、等曲げ区間内のみを対象とし電食により生じさせている。供試体は平均要素寸法20mmでモデル化した。なお、今回鋼材腐食に用いているPC鋼より線は直径が小さく、仮想腐食膨張領域を鋼材面積とすると、ボロノイ要素寸法より小さくなることから、2.3節で説明した仮想腐食膨張領域の直径を20mmと設定した。

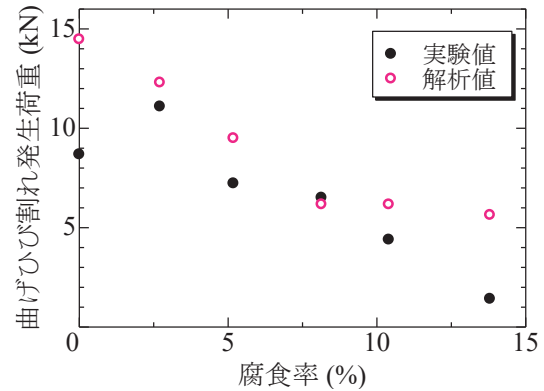


図-1-2 曲げひび割れ発生荷重-腐食率関係

4.2 鋼材が局所的な腐食を有している場合の曲げ特性

図-10に各供試体における腐食終了時と中央変位約30mmの終局時のひび割れ状況を示す。実験で得られたひび割れ図は青色が腐食ひび割れを、赤色が荷重ひび割れを表している。まず、荷重前の腐食ひび割れ進展状況は、実験と解析共に、健全と腐食率2.71%の供試体では、供試体側面に腐食ひび割れは生じなかった。一方腐食の程度が比較的大きな供試体の場合においては、腐食ひび割れ発生位置、長さが実験結果と一致することが確認できる。図-11に実験と解析における各腐食率に対して得られた荷重-中央変位関係を示す。実験では腐食率の増加による初期剛性の低下は小さいが、曲げひび割れ発生荷重、曲げ耐力、曲げ変形性能の低下が確認されている。また、破壊モードは健全な供試体および腐食の程度が比較的小さい供試体(2.71%, 5.18%)は曲げ引張破壊、腐食程度が大きい供試体(8.14%, 10.4%, 13.8%)は鋼材破断と報告されている。一方解析では、健全な供試体の荷重-変位関係は、ほぼ実験値と一致した。また、腐食した鋼材の力学特性の変化を考えていないが、コンクリートの圧縮強度が同じ2.71%, 5.18%, 8.14%, 10.4%に関して、腐食率の増加に伴う剛性の低下がみられた。これは腐食による付着挙動の劣化を自動的に評価したためである。耐力については、実験では腐食率が高い供試体では鋼材破断が生じており、腐食率による影響がみられるが、解析では概ね等しい値であった。また、変形性能も同様でありすべての供試体で曲げ破壊となった。これは鋼材の断面の力学的特性を考えておらず、破断の影響を考慮していないためである。図-10に示すひび割れ進展において、腐食率が小さいものでは曲げひび割れの発生位置に変化が見られないが、腐食率が高いものでは、腐食ひび割れと荷重荷重によるひび割れの両者を妥当に再現している。

図-11に腐食率10.4%における終局時の部材内の鋼材のひずみが最大となる位置での鋼材ひずみの履歴を示している。陸ら⁸⁾は腐食率に対する破断伸び比の関係式を示しているが、その関係式によれば、ひずみが健全な鋼材の35.9%の0.0178がこの鋼材の破断ひずみとなる。そのひずみに対応する変位は約14.4mmとなる。実験では変位が約11mmの時点で鋼材破断が生じているため概ね近い値を得ることができる。このことから、破断も考慮した鋼材の応力-ひずみ関係を導入すれば、腐食率が高い供試体の終局状態まで解析で追跡できると考えられる。

実験で腐食率の増加に伴い曲げひび割れ発生荷重が低下することが観察されたため、本解析で得られた曲げひび割れ発生荷重と比較した結果を図-12に示す。解析結果で得られた曲げひび割れ発生荷重は腐食率8.4%までは急激に低下していくが、それよりも腐食率が大きくなるとその低下勾配は緩

やかになった。腐食率8.4%までは、曲げひび割れ発生荷重の解析値は実験値と概ね一致することから、ある程度の腐食率までは再現できることが示された。

5. 結論

本研究において以下の知見が得られた。

- 1) プレストレス力作用下の一軸部材では、腐食ひび割れが生じたのちもプレストレス力の影響により、軸直角方向のひび割れの発生を抑制していることが確認された。
- 2) PCはりの曲げ試験の解析結果から、鋼材の力学特性の変化を考慮していなくても、腐食率の小さい段階では本解析手法で、初期剛性の低下、曲げひび割れ発生荷重の低下を再現できることが示された。
- 3) 鋼材の破断ひずみから算定した部材の終局変位は実験と概ね一致し、本モデルに腐食時の鋼材の応力-ひずみ関係を導入すれば、腐食ひび割れの発生から荷重載荷による終局状態まで妥当に再現できると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題:18H01510)により行った。ここに記して敬意を表する。

参考文献

- 1) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: PC鋼より線の局所的な腐食がPCはりの耐荷性状に及ぼす影響, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.297-302, 2012
- 2) 武田健太, 田中泰司, 下村匠, 山口貴幸, 陸賢, 井林康, 村上祐貴: 塩害劣化したプレテンション式PC桁の載荷試験と解析による耐力評価手法の検討, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol.71, No.4, pp.303-322, 2015.
- 3) Toongoenthong, K. and Maekawa, K. : Simulation of Coupled Corrosive Product Formation, Migration into Crack and Propagation in Reinforced Concrete Sections, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3(2), pp.253-265, 2005
- 4) 渡辺勇輝, Usman Farooq, 中村光, 三浦泰人: 3次元剛体バネモデルとはり要素を組合わせた手法による腐食したRC部材の付着解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.643-648, 2019
- 5) Qiao, D., Nakamura, H., Yamamoto, Y., Miura, T. : Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion, Construction and Building Materials, Vol.116, pp.366-377, 2016
- 6) C.L.Nguyen., Nakamura, H., Miura, T., Yamamoto, Y. : Analysis of Corrosion-induced Crack Propagation of RC Members Modeling by Corrosion Expansion Pressure Around Beam Element, Proceeding of JCI annual conventional, Vol.39, No.2, pp.961-966, 2017
- 7) Shang, F., An, X., Mishima, T., and Maekawa, K : Three-dimensional Nonlinear Bond Model incorporating Transverse Action in Corroded RC Members, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No. 1, pp.89-102, 2011
- 8) 陸賢, 田中泰司, 山口貴幸, 下村匠: 腐食したPCより線の機械的性質とプレテンションPC梁の残存耐力評価, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.211-216, 2012