

論文 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

渡辺 勇輝*1・Usman Farooq*2・中村 光*3・三浦 泰人*4

要旨：鉄筋腐食してひび割れが入った RC 部材の付着解析を少ない計算コストで行うことを目的とし、コンクリートを3次元剛体バネモデル、鉄筋をはり要素でモデル化することで、腐食ひび割れ進展を追跡可能な解析手法を構築し、腐食した RC 部材の付着解析により、その可能性を検討した。両引き試験結果を対象とした検証の結果、提案する解析手法は、かぶりや鉄筋腐食量に従った付着強度の低減などの付着に影響を及ぼす要因を考慮した付着応力-すべり関係を用いなくても、腐食による付着劣化挙動や、腐食部材の付着ひび割れ進展挙動を再現可能なことを示した。

キーワード：付着挙動、付着ひび割れ、腐食ひび割れ、かぶり、付着応力-すべり関係

1. はじめに

鉄筋が腐食すると、鉄筋周辺の腐食生成物、鉄筋の形状変化、鉄筋周辺のコンクリートのひび割れの発生により、ある一定以上の腐食量になるとコンクリートと鉄筋の付着強度が低下することが知られている¹⁾。鉄筋コンクリート部材の構造性能は、鉄筋とコンクリートとの付着性能に密接な関係があることから、鉄筋腐食がコンクリート部材の挙動に及ぼす影響を評価するには、付着挙動の変化の理解が不可欠である。そのため、鉄筋腐食した場合の付着挙動に関する研究は実験的に数多く行われてきた^{例えば、2)3)}。

一方、数値解析的に鉄筋腐食による付着挙動の変化を直接評価した検討もいくつか行われているが⁴⁾、その場合は鉄筋の節までをモデル化した3次元メソスケール解析で行われている。これは、鉄筋腐食による腐食ひび割れを正確に評価するためには鉄筋の3次元モデルが一般に必要⁵⁾となることと、付着を直接解析するには節形状までのモデル化が必要となるためである。しかし、メソスケール解析を行うためには膨大な数の要素が必要となり、計算コストが膨大になることから、現状では現実的ではなく、構造物レベルまでの解析を行うのは困難である。

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、鉄筋をはり要素でモデル化し、腐食ひび割れ進展解析を行う手法を開発している⁶⁾。もし、この手法で付着解析まで実施可能であれば、腐食劣化したコンクリート構造

物の構造性能を解析的に評価することも比較的容易に実施できることになる。

そこで本研究では、著者らが開発した3次元剛体バネモデルとはり要素を組み合わせた手法による、腐食ひび割れが生じた場合の付着解析の可能性を検討した。通常、付着解析を行う場合は、かぶりや鉄筋腐食量に従った付着強度の低減など、付着に影響を及ぼす要因を含んだ付着構成則が一般に用いられる。しかし本研究では、鉄筋の節までモデル化したメソスケール解析同様に、付着に影響する要因を解析上、考慮することなく唯一の付着応力-すべり関係のみで、かぶりや腐食の影響を考慮できるかを検討の目的とした。

2. 解析手法の概要

1章でも述べたように、著者らはコンクリートを3次元剛体バネモデル(RBSM)、鉄筋をはり要素でモデル化し、鉄筋を3次元でモデル化することなく鉄筋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ている⁶⁾。ここではその解析手法の概要と本論文で新たに考慮した付着解析に係わるモデルについて説明する。

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は様々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よ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を参照していただきたい⁷⁾。

*1 名古屋大学 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋大学 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*3 名古屋大学 工学研究科土木工学専攻 教授 博(工) (正会員)

*4 名古屋大学 工学研究科土木工学専攻 助教 博(工) (正会員)

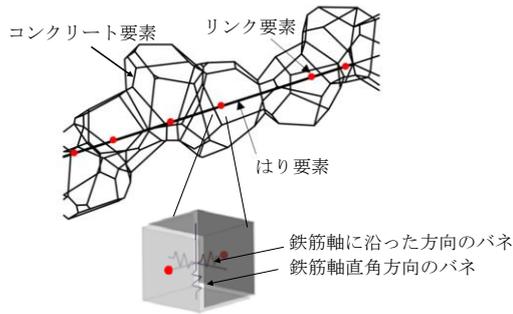


図-1 3次元RBSMとはり要素

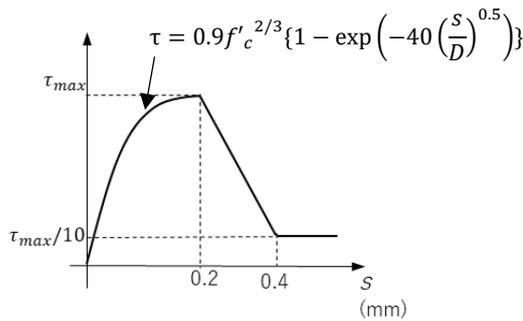


図-2 付着応力-すべり関係

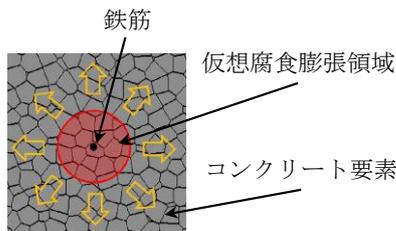


図-3 仮想腐食膨張領域

2.2 鉄筋と付着モデル

鉄筋は図-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。リンク要素の鉄筋軸に沿った方向のバネが、コンクリート要素と鉄筋要素間の付着による荷重伝達を担う。リンク要素の鉄筋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式(1)に示す関数を、強度時以降は、応力が線形で低下し、その後一定値となるものである。

$$\tau = 0.9f'_c \frac{2}{3} \left\{ 1 - \exp\left(-40 \left(\frac{s}{D}\right)^{0.5}\right) \right\} \quad (1)$$

ここで、s: すべり量 (mm), D: 鉄筋径 (mm), f'_c : 圧縮強度 (N/mm²)

2.3 仮想腐食膨張領域を仮定した腐食ひび割れ解析⁶⁾

腐食によるひび割れ進展を再現するためには、ひび割れパターン、ひび割れ幅、かぶり厚さ、鉄筋直径、鉄筋の局所的腐食による膨張圧等が影響するため、実際の鉄筋の断面積のモデル化が重要である。しかしながら、本手法の鉄筋のモデル化に使用するはり要素は、実面積を

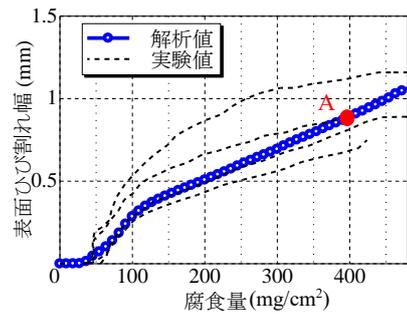


図-4 表面ひび割れ幅-腐食量関係

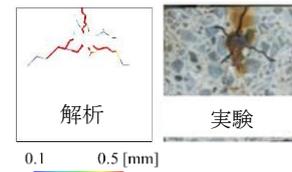


図-5 内部ひび割れパターン

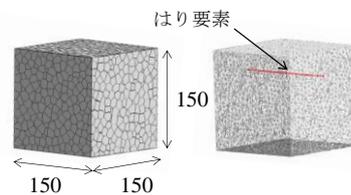


図-6 解析モデル

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仮定の鉄筋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、仮想腐食膨張領域以外の特徴としては以下の点が挙げられる。

- かぶり方向に進展したひび割れの鉄筋位置の幅が基準値(0.2mm)以上に開いた場合、膨張力をそのひび割れ側に部分的に集中させる。
- 腐食生成物のひび割れ面への移動を考慮し、かぶり方向に向かうひび割れ体積分の腐食生成物の体積を減じた量が、ひび割れ進展に伴う膨張圧に寄与するとして、膨張圧をひび割れ幅の拡大に従って低下させる。これらの詳細な計算方法などは参考文献⁶⁾を参照願いたい。

ここで、本モデルを用いて Tran ら⁵⁾によって行われた腐食実験を対象とした腐食ひび割れ進展の結果を示す。図-4に表面ひび割れ幅と腐食量の関係を、図-5に図-4中A点に対応する実験終了時の内部ひび割れの実験値と解析値を示す。本解析で、腐食生成物によるひび割れ幅

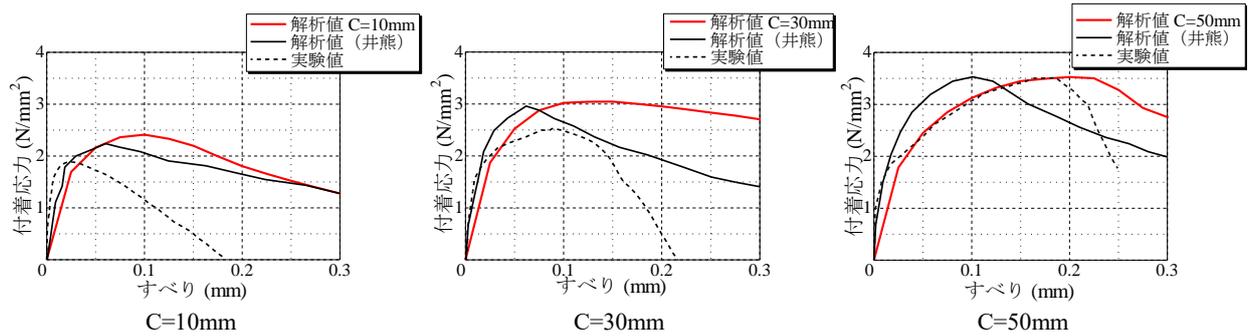


図-7 付着応力-すべり関係

すべり量 (mm)	C=30mm			C=30mm (井熊ら)		
	変形図 倍率(50倍)	3次元の ひび割れ進展	中央断面の ひび割れ進展	変形図 倍率(50倍)	3次元の ひび割れ進展	中央断面の ひび割れ進展
0.05						
0.15						
0.30						

0.01mm 0.1mm

図-8 かぶり 30mm の変形図・ひび割れ性状

の非線形な拡大傾向、内部ひび割れの進展状況など、腐食ひび割れ進展挙動を再現可能であることが分かる。

3. 腐食していない鉄筋の付着解析

本研究では、式(1)に示した付着応力-すべり関係を用いて、鉄筋をはり要素によってモデル化し、付着挙動の再現を試みた手法で、かぶり厚さが付着挙動に及ぼす影響を、メゾスケール解析と同程度で評価できるかを検討した。なお、比較するメゾスケール解析モデルは、井熊ら⁸⁾がRBSMを用いて行ったものとした。

(1) 解析対象および解析モデル

解析対象は、松本ら⁹⁾によって行われた、寸法 150×150×150mm の供試体に D25 の異形鋼棒をかぶり 10, 30, 50mm で変化させて配置させた場合の両引き試験とした。図-6 に解析モデルを示すが、平均ポロノイ要素寸法は 10mm とし、はり要素は鉄筋の中心位置に配置するようにモデル化した。

(2) 実験結果およびメゾスケール解析モデルとの比較

図-7 に実験、メゾスケール解析モデルおよび本解析から得られた付着応力-すべり関係を示す。実験ではかぶりが大きくなるにつれて最大付着応力とそのすべり量が増加していることが確認され、本解析は実験と同様にかぶりの増加に伴う付着強度や最大強度時のすべりの増加を再現している。また、メゾスケール解析結果と比較すると、軟化勾配の違いはあるが、かぶり厚さの差異による影響は同様である。

図-8 にかぶり 30mm の時の内部と表面のひび割れの進展、およびメゾスケール解析モデルの結果を示す。本解析の結果が、鉄筋端部からコーン状に進展する内部ひび割れ、内部ひび割れの進展角度と進展長さ、表面ひび割れ状況とも、3次元メゾスケール解析と同様な性状を示していることが分かる。以上のことから節までをモデル化しなくても、計算コストが低いはり要素を用いた本解析が、3次元メゾスケール解析と同程度の精度を持つことが示された。

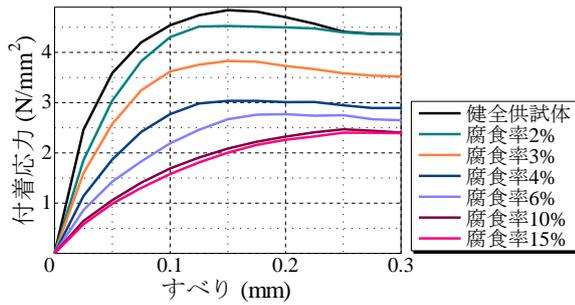


図-9 付着応力-すべり曲線

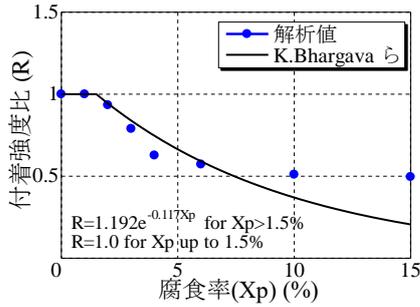


図-10 付着強度比-腐食率関係

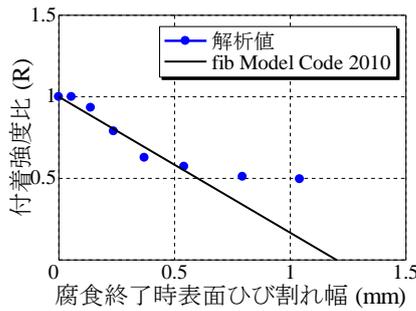


図-11 付着強度比-腐食終了時表面ひび割れ幅関係

4. 腐食ひび割れの影響を考慮した付着解析

本章では2章で示した腐食ひび割れ解析により腐食ひび割れを導入した後に、3章で示した両引き解析を行い、腐食ひび割れが発生した場合の付着挙動の解析的評価を試みた。対象の供試体は2種類とし、付着応力-すべり関係ならびにひび割れ進展挙動の評価をそれぞれ行った。

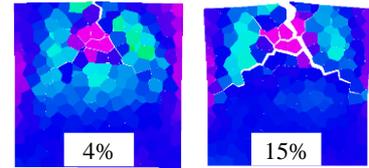
4.1 両引き試験の付着解析

(1) 解析対象

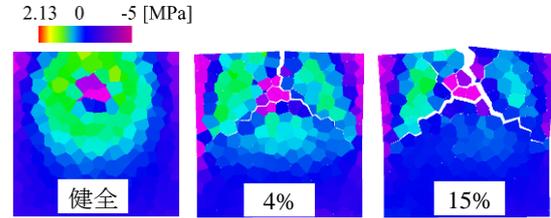
3章で用いた、かぶり30mmの供試体と同じ寸法の供試体を用い、腐食ひび割れが発生した場合の付着解析を行った。解析は、1%から15%までの腐食率を与えた後、すべり量0.3mmまで鉄筋の両端部に引張力を与えた。なお、腐食率は鉄筋の断面減少率を示している。

(2) 腐食率が付着強度に及ぼす影響評価

図-9に各腐食率に対して得られた付着応力-すべり関係を示す。腐食率の増加に伴い、付着強度、初期剛性は徐々に低下し、軟化勾配が緩やかになる結果が示された。図-10に腐食させた供試体の付着強度を健全供試体



(a) 腐食終了時



(b) すべり量0.15mm時点

図-12 断面の鉄筋軸方向応力分布

のそれで除して正規化した付着強度比と腐食率の関係を、図-11に付着強度比と腐食終了後の表面ひび割れ幅の関係を示す。また図-10には、Bhargavaら¹⁰⁾より提案されたモデルの値を、図-11にはfib model code 2010に記載されている軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じている場合の付着強度の低減係数の値¹¹⁾を示す。腐食率2%まで低下することなく、2%~4%まで比較的急激に低下し、それより腐食率が大きくなると、その低下勾配は緩やかになった。それに対応する表面ひび割れ幅と付着強度比の関係は同様の傾向が確認できる。特に腐食率2%の時は、表面ひび割れは発生せず、表面ひび割れが発生すると付着強度が低下するように見受けられる。腐食率または表面ひび割れ幅が小さい場合はいずれも既往のモデルと同程度の結果が得られた。これにより、本手法は腐食ひび割れが生じた場合の付着挙動を妥当に評価できることが確認された。ただし、腐食率が大きい場合は既往のモデルより付着低下を過小評価する結果となった。その原因として、腐食した鉄筋の付着強度は、鉄筋の形状変化、ひび割れ、鉄筋表面の錆の状況に影響し、中でも、鉄筋の形状変化は腐食率が大きくなると影響が大きくなることが既往の実験で示されている¹⁾。本研究ではこの3つの要因のうち、ひび割れの影響のみを考慮しているため、既往のモデルよりも過小評価をしたと考えられる。

腐食ひび割れの進展が付着強度に及ぼす影響を、断面内の応力分布から考察を行う。図-12に供試体の端部から3/8L(L:150mm)の位置の断面の腐食率4、15%の時の腐食終了時(図-12(a))の応力分布と、腐食なしならびに対応する腐食率の付着強度付近のすべり量0.15mm(図-12(b))時点での応力分布を示す。図-12(a)に示す腐食終了時の応力分布は、鉄筋を囲むように引張応力が分布し、腐食率15%の時点のように、ひび割れが発生すると、ひび割れ周囲は応力が解放され、応力が分布する領域は小さくなるのが分かる。一方、図-12(b)に示す付着力を

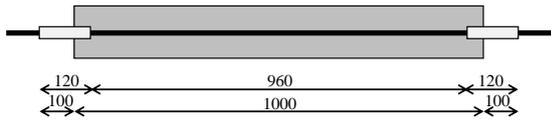


図-13 供試体概要

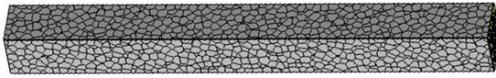


図-14 解析モデル

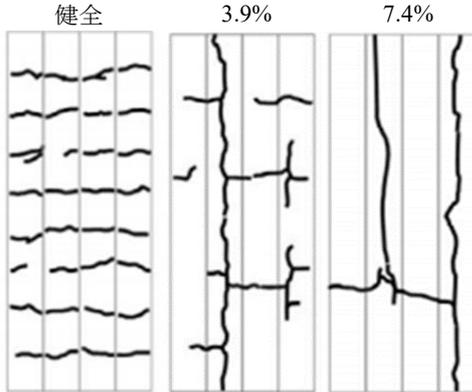


図-16 ひび割れ展開図 (実験)

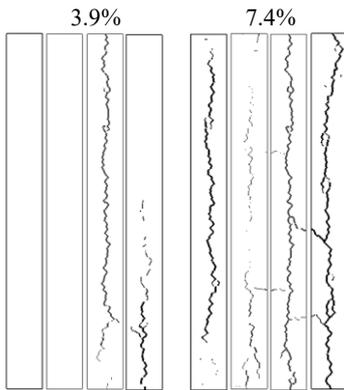


図-17 腐食終了時でのひび割れ展開図 (解析)

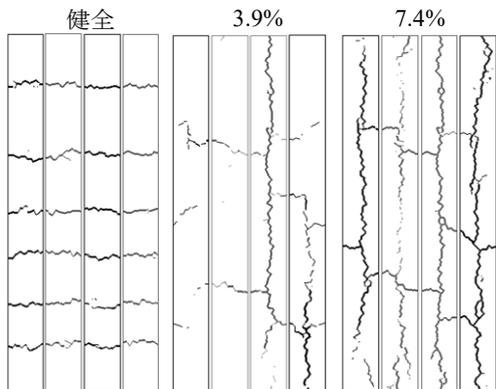


図-18 鉄筋降伏時におけるひび割れ展開図 (解析)

作用させた後の応力分布は、腐食していない場合は、鉄筋を囲むように引張応力が分布していることがわかる。これは図-8のひび割れ図から、斜め方向のひび割れ領域の外側の領域でひび割れ進展に抵抗する力が発生していることを示していると考えられる。一方、腐食が大き

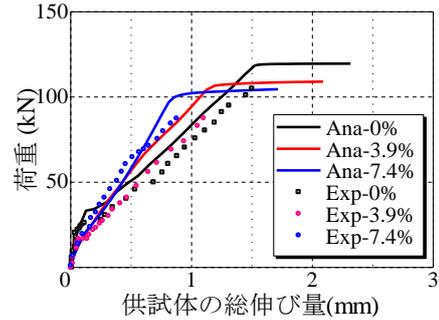


図-15 荷重—供試体の総伸び量¹³⁾

なると、腐食ひび割れの周囲には、大きな引張応力は発生せず、応力が伝達されている領域が小さくなっていくことがわかる。これらの応力が負担している領域は腐食終了時と概ね一致している。このことから、腐食終了時に応力伝達領域は腐食ひび割れにより概ね決定され、腐食時のひび割れにより応力伝達領域が減少することで、付着強度が低下したと推察される。

4.2 比較的長いRC一軸部材の付着解析

(1) 解析対象

Shang ら¹²⁾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、一軸載荷により腐食後のひび割れ分散性を検討した実験を解析した。供試体の諸元を図-13に示す。対象とした供試体は、長さ1000mmで100×100mmの断面を有し、断面中心に直径20mmの鉄筋1本が設置されている。解析モデルを図-14に示す。要素寸法は鉄筋近傍を5mmとし、そこから離れるに従い15mmへと変化させた。なお、今回鉄筋が断面中心に配置されており、かぶり厚さが均一であるため、腐食膨張圧は鉄筋全方向に様にかかるとし、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。

図-15に健全、腐食率3.9、7.4%の供試体の実験から得られた荷重—供試体の総伸び量関係、図-16に鉄筋降伏時のひび割れ展開図を示す。図-15に示す荷重—供試体の総伸び量関係では、腐食率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ことが示されている。一方、図-16のひび割れ図では、付着による横方向ひび割れの分散性が健全供試体で確認され、腐食率が大きくなるにつれて鉄筋軸方向にひび割れが進展し、加えて、付着に関する横ひび割れの数が減少している。

(2) 実験結果との比較による妥当性の確認

図-15に前述の3つの供試体の解析で得られた荷重—供試体の総伸び量関係を併記する。今回、供試体端部の鉄筋軸方向の変位差を供試体の総伸び量とする。腐食率が増加することによって、同じ荷重レベルでの総伸び量が小さくなり、実験と同様の結果が示された。また、腐食率が大きくなるにつれて、鉄筋降伏時の荷重が低下す

ることも示された。図-17に腐食解析終了時、図-18に鉄筋降伏時の各供試体におけるひび割れ展開図を示す。図-17の腐食後のひび割れ図から、腐食率が増加すると鉄筋に沿った軸方向ひび割れが顕著に発生することが分かる。腐食率7.4%時においては4面すべてにひび割れが発生し、一部のひび割れは横方向にも進展していた。図-18に示す鉄筋降伏時においては、健全供試体では実験と同様に付着による横方向ひび割れの分散性が確認された。また、腐食率3.9, 7.4%では、新たに生じるひび割れの数は少なく、実験結果と同様にひび割れの分散性は減少することが示された。これにより、本モデルを用いれば、付着応力-すべり関係のみ考慮することで、腐食による付着力の低下を再現するとともに、付着低下によるひび割れ分散性の影響も評価可能なことが示された。

5. 結論

本研究において開発した3次元RBSMとはり要素を組合わせた手法を用いて、腐食した鉄筋を有するRC部材の腐食ひび割れが付着挙動に及ぼす影響の再現性を検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 3次元RBSMとはり要素を組合わせた手法を用いると、かぶりの影響を考慮しない付着応力-すべり関係を用いた場合でも、かぶりの影響を含む付着挙動を評価できる。
- (2) 腐食ひび割れの発生による付着強度の低下を、腐食率が10%以下の場合に、既往の経験式と同程度に評価可能であることが示された。
- (3) 腐食ひび割れが発生した時の付着力の低下は、腐食ひび割れによって応力伝達領域が減少することによって引き起こされることが示唆された。
- (4) 腐食による付着力の低下に伴うひび割れ分散性の変化を評価可能であることを示した。

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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Yang, Y., Nakamura, H., Miura, T. and Yamamoto, Y., Effect of corrosion-induced crack and corroded rebar profile on bond stress and slip relationship, Proceeding of JCI annual conventional, Vol.40, pp.927-932, 2018
- 2) Almusallam, A.A., Al-gahtan, A.S., Aziz, A.R and

- Rasheeduzzafar, Effect of reinforcement corrosion on bond strength. Construction and Building Material, Vol.10, pp.123-129, 1996.
- 3) Fang, C., Lundgren, K., Chen, L. and Zhu, C., Corrosion influence on bond in reinforced concrete. Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.2159-2167, 2004
- 4) Toongoenthong, K. and Mackawa, K. : Simulation of Coupled Corrosive Product Formation, Migration into Crack and Propagation in Reinforced Sections, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3(2), pp. 253-265, 2005
- 5) Tran, K. K., Nakamura, H., Kawamura, K., and Kunieda, M., Analysis of crack propagation due to rebar corrosion using RBSM, Cement and Concrete Composites, Vol.33, pp.906-917, 2011
- 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, Vol39, No. 2, pp.961-966, 2017
- 7) Qiao, D., Nakamura, H., Yamamoto, Y., and 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
- 8) 井熊 晃司, 山本 佳人, 中村 光, 三浦 泰人 : RBSM-FEM 結合解析手法による異形鉄筋の付着機構のメソスケールシミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.541-546, 2018
- 9) 松本隆明, 檜貝 勇, 斉藤 成彦 : かぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol26, No. 2, pp.823-828, 2004
- 10) Bhargava, K., Ghosh, A. K., Mori, Y. and Ramanujam, S., Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete- Analytical and empirical models. Nuclear Engineering and Design, Vol.237, pp.1140-1157, 2017
- 11) Fib Bulletin 65 : Model code 2010, Final draft-Vol.1
- 12) Shang, F., An, X., Mishima, T., and Mackawa, 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