

鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひび割れ形成に関する メゾスケールモデルの構築

環境社会基盤工学専攻 コンクリート研究室：小池 耕太郎

指導教員：下村 匠

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食は、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の最も一般的な劣化要因である。鉄筋が腐食した構造物の保有性能を評価するためには、内部の鉄筋の腐食状況を知る必要がある。最も簡便な方法は外観から推定する方法であり、構造物表面の腐食ひび割れの有無が有効な情報となる。しかし、表面の腐食ひび割れ幅と内部の鋼材の腐食量の間には多くの要因が影響するため、精度の良い定量関係を導き出すことは困難であることが知られている^{例えば1)}。

このような背景から、構造物表面の腐食ひび割れ幅から腐食量を関係付ける研究は、これまでに多数実施されている。これらは腐食ひび割れや腐食量といった材料劣化を局所的に関係付けているが、実現象としてこのような材料劣化は構造物中で一様に発生しない。そのため、現在提案されている、腐食ひび割れ幅と腐食量を関係付けるモデルでは十分な精度が得られていない。

加えて、鉄筋の腐食膨張によるひび割れは、コンクリート表面に発生する表面ひび割れだけでなく、隣接する鉄筋間同士を結合するひび割れ、すなわち内部ひび割れの形成が考えられる²⁾。そのため、表面ひび割れ性状から鉄筋の腐食量を関係付ける際、内部ひび割れの発生・進展による影響を考慮する必要がある。

本研究では、RC 構造物の外観性状から鉄筋の腐食量を推定する手法を提案することを目的として、有限な体積領域内の腐食ひび割れおよび腐食量の関係に着目し、材料劣化の空間的不均一性および内部ひび割れ発生・進展による影響を反映した鉄筋の腐食量予測モデルを検討した。

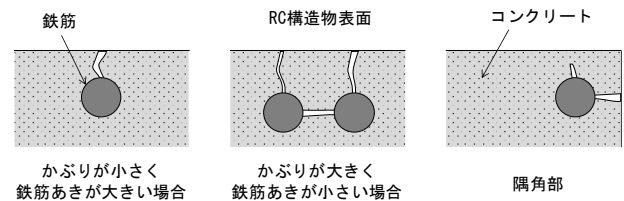


図-1 鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひび割れ

2. メゾスケールモデルの概要

図-1 は、ある有限なコンクリート部材内における、鉄筋の腐食膨張に伴う腐食ひび割れ（表面ひび割れおよび内部ひび割れ）の発生パターンを模式的に示したものである。コンクリート表面のひび割れ性状から鉄筋の腐食量を推定する場合、従来は表面ひび割れ幅とその直下にある鉄筋の腐食量（腐食による断面減少率）を関係付けている。しかし、腐食ひび割れや鉄筋腐食といった RC 構造物の材料劣化は、部材中で一様に発生しない。特に、腐食ひび割れの形成に関しては、密な配筋条件の場合にコンクリート表面（表面ひび割れ）だけでなく、鉄筋間を結合するようなひび割れ（内部ひび割れ）も形成されることが考えられる。また、部材内隅角部の鉄筋が腐食した場合、ある断面にのみ腐食ひび割れが発現するといった現象が考えられる。そのため、材料劣化を局所的関係付けることによって、ばらつきが生じる。

そこで、腐食ひび割れ（表面ひび割れ+内部ひび割れ）の形成に費やされた力が、腐食生成物の膨張によって行われた仕事（=腐食量）である、という概念を導入することで、材料劣化のばらつき

表-1 示方配合

粗骨材の 最大寸法	スランブ	水セメン ト比	細骨材率	空気量	単位 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
					W	C	S	G	Ad
25	12	53	41	6	153	286	759	1137	2.89

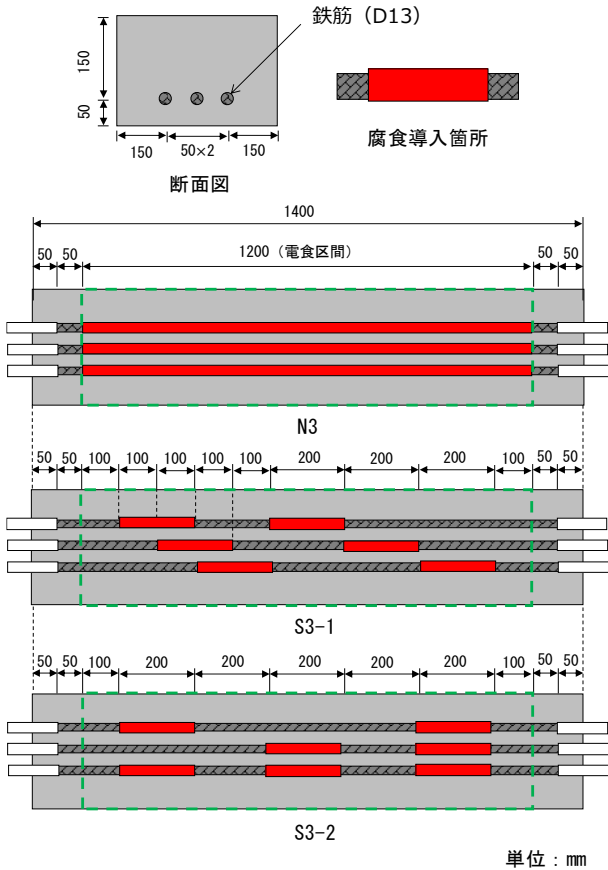


図-2 供試体概要

きに関する問題の解決を図る。そのため本研究では、ある有限なコンクリート部材の体積内における材料劣化の平均値を関連付けることを特徴としているため、これをメゾスケールモデルと呼称した。

3. 鉄筋腐食量算定式の検討

3.1 実験概要

(1) 供試体概要

表-1 に示方配合、図-2 に、供試体の概要を示す。本実験では、コンクリート部材表面に発現する腐食ひび割れパターンを変化させるため、軸方

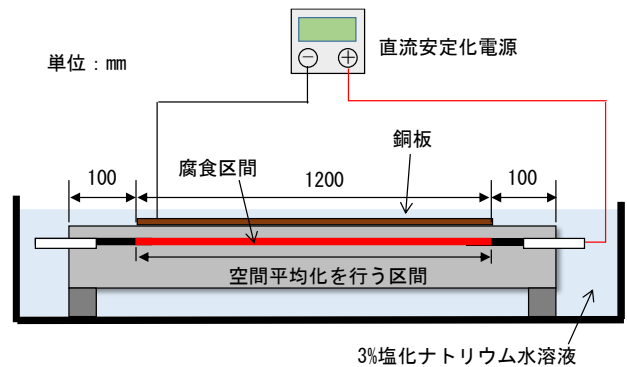


図-3 電食試験装置

向に不均一な腐食を導入した。図中の、赤色で示している箇所が腐食を導入する区間である。それ以外の箇所は、エポテクトールフリー（以下、エポキシ樹脂）で塗装することによって絶縁処理を行い、鉄筋は既往研究の供試体と同様に D13 を用いた。また、各供試体の寸法は、高さ 200mm、幅 400mm、長さ 1400mm としており、端部の影響を考慮して電食区間は端部からそれぞれ 100mm を除いた 1200mm、かぶり が 43mm、鉄筋あきが 37mm とした。また、本研究では、比較のために既往研究^{1),3)}で用いられた供試体の実験結果をあわせて示している。本論文では、既往研究¹⁾で用いられた単鉄筋供試体に軸方向均一に腐食を導入させたシリーズを BMT、既往研究³⁾で用いられたそれぞれの鉄筋に均一な腐食を導入させた供試体を N13-10-1, N13-10-2, そしてある鉄筋のみに腐食を導入させた供試体を N13-30 と呼称している。

(2) 電食試験概要

図-3 に、電食試験装置の概要図を示す。供試体は、最小かぶり面を上側して設置し、3%塩化ナトリウム水溶液中に浸漬させ、鉄筋を陽極、銅板

を陰極に接続した。電流密度は $0.865\text{mA}/\text{cm}^2$ とし、目標腐食減量率は 15% とした。シャント抵抗 (1Ω) の電流を経時的に測定し、積算電流量を算出した。腐食量の調整は、ファラデーの法則に基づいて積算電流量と腐食による質量減量が比例関係にあるとして算出した。

(3) 測定値

電食試験終了後、クラックスケールを用いて 50mm 間隔で表面のひび割れ幅を、ノギスを用いて長さを計測した後、供試体から鉄筋をはつり出し、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬させて腐食生成物を除去し、鉄筋の質量減少量を測定した。

3.2 材料劣化の空間的不均一性

図-4 に、軸方向に 50mm ピッチ間隔で表面ひび割れ幅および鉄筋の断面減少率を測定した結果を示す。なお、同一断面に複数の腐食ひび割れが確認された場合は、合計値とした。図より、いずれのデータも各位置における表面ひび割れ幅と断面減少率の関係はばらつきが大きく、両者の間に明瞭な関係は見られない。本研究では、材料劣化の空間的な不均一性を考慮するため、任意に設定した領域内の、表面積あたりのひび割れ面積（幅 mm × 長さ mm）と体積あたりの腐食量（ mg/mm^3 ）を算出し、実験結果を整理した。なお、表面積あたりのひび割れ面積は、本研究ではひび割れひずみと呼称している。図-5 に、表面ひび割れひずみと体積あたりの腐食量関係を示す。このようなデータ整理を行うことにより、表面ひび割れひずみと腐食量の間に関係が見られた。

この結果は、ひび割れや鉄筋腐食といった材料劣化を考える際、コンクリート部材中のある領域体積内において関係付けることが有効であることを示している。

3.3 腐食生成物の流動による影響

岡崎ら⁴⁾は、腐食ひび割れ発生以降、コンクリート表面の腐食ひび割れ幅と、内部鉄筋の腐食量

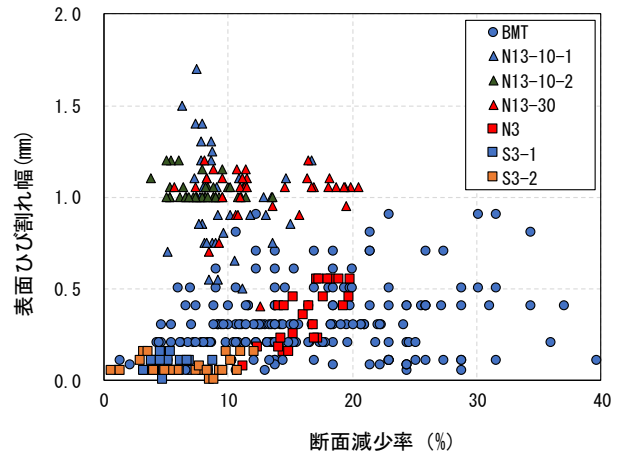


図-4 表面ひび割れ幅—鉄筋の断面減少率関係

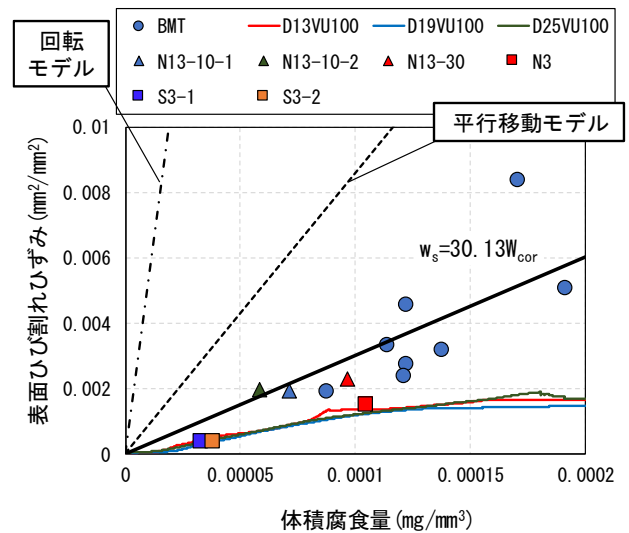


図-5 表面ひび割れひずみ—腐食量の関係

を関係付ける最も単純な力学モデルとして、二次元の剛体モデルを提案した。

それぞれモデルでによって算出される腐食ひび割れ幅の増加量 Δw を以下に示す。

平行移動モデル（最小値）：

$$\Delta w = 2\Delta u \quad (1)$$

$$\Delta u = (\gamma - 1)2r_s b$$

回転モデル（最大値）：

$$\Delta w = 2\Delta u + 2(c + 2r_s) \frac{\Delta u}{r_s} \quad (2)$$

ここで、 Δw : 腐食ひび割れ幅の増加量 (mm), Δu : 腐食膨張による鉄筋半径増加量 (mm), r_s : 腐食前鉄筋半径 (mm), γ : 腐食膨張率 (1.3), β : 腐食減量率, c : コンクリートのかぶり厚 (mm) である。

また、式(1)(2)はいずれも以下の仮定を設けている。①ひび割れ幅の増加量 Δw を算定するものであるため、 Δu が0のときはひび割れ幅も0とする。②コンクリートは、ひび割れが発生した後は剛体とする。

本検討では、対象領域内に発生した表面ひび割れを1本のひび割れに置き換え、剛体モデルを適用させた。

図-5より、実測値は平行移動モデル(最小値)で計算される値よりも小さいことがわかる。この原因としては、腐食生成物は粘性のある流動物であるため、鉄筋周囲の空隙やひび割れ内への侵入、ひび割れ開口部からの流出といった影響が考えられる。しかし、この剛体モデルは鉄筋の腐食膨張にともないかぶりコンクリートが押し広げられる剛体変形が卓越するイメージである。

そこで筆者ら⁵⁾が行った、コンクリート中の鉄筋腐食により生じる膨張挙動を実測した結果を図中に示した。文献5)は、供試体を拘束した状態で電食試験を行っているため、発現する腐食ひび割れは拘束されていない状態での電食試験結果よりも小さい結果ではあるが、最小値である平行移動モデルによる計算値と腐食生成物の膨張挙動に関する実測値の間に、各供試体の表面ひび割れひずみと腐食量関係が収まっている。この結果から、鉄筋腐食量の算定式における腐食膨張を表す係数として実験値の中央値を用いることとする。

3.4 内部ひび割れの影響

筆者ら⁶⁾は、かぶり c および鉄筋あき s の値によらず、両者の比 c/s が 1.0 を境に傾向が変化し、

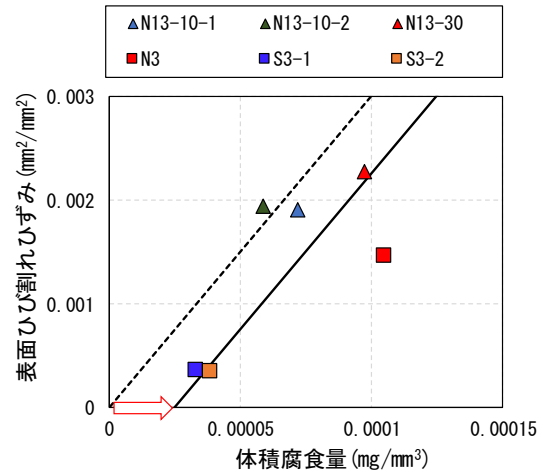


図-6 表面ひび割れひずみ-腐食量の関係

かぶりが鉄筋あきよりも大きいと内部ひび割れが先行し、表面ひび割れの発生が遅れる傾向にあることを示した。そこで文献6)より、先行するひび割れが卓越することから、 c/s が 1.0 未満の場合は内部ひび割れを考慮せず、 c/s が 1.0 以上であれば内部ひび割れが形成されていると判断し、前者は式(3)、後者の場合は式(4)を用いて、コンクリート表面の腐食ひび割れ性状から、鉄筋の腐食量を算出する。

$c/s \leq 1.0$ の場合：

$$W_{cor} = \frac{w_s}{a} \quad (3)$$

$c/s > 1.0$ の場合：

$$W_{cor} = \left(w_s + \frac{\sum s \times L}{S} k \right) / a \quad (4)$$

ここで、 W_{cor} : 体積あたりの腐食量 (mg/mm^3), w_s : 対象表面積あたりのひび割れ面積 (mm^2/mm^2), s : 最外縁の鉄筋あき (mm), L : 奥行き方向長さ (mm), S : 対象領域の表面積 (mm^2) k : 低減係数 (0.002) a : 腐食膨張を表す係数 (30.13) である。

図-6に、 c/s が 1.0 以上の供試体における、表面ひび割れひずみと腐食量の関係を示す。図より、式(4)による計算値は、式(3)で計算される値よりも実測値に近いことがわかる。この結果は、鉄筋の

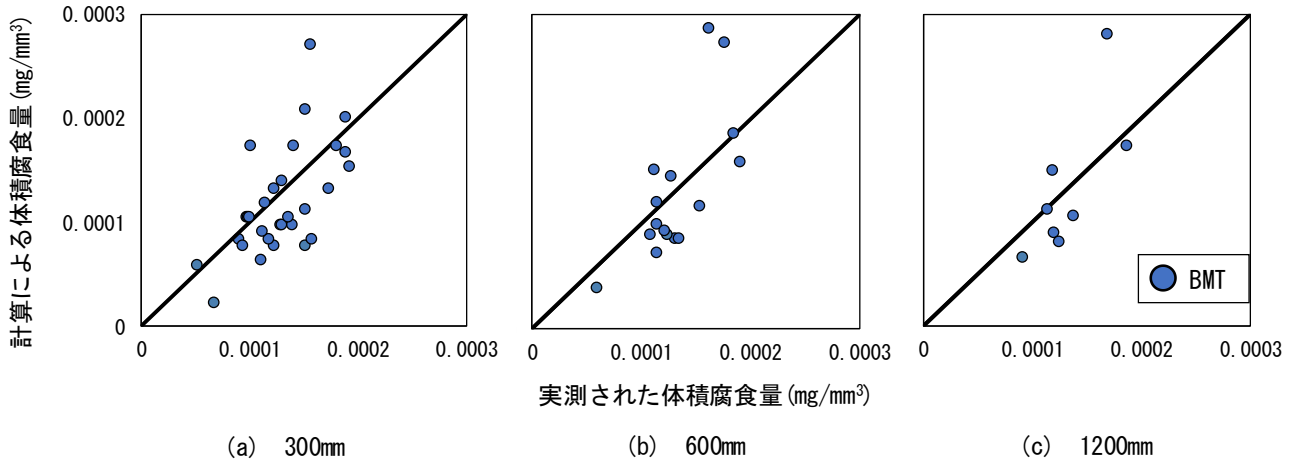


図-7 計算値および実測値の比較 ($c/s \leq 1.0$)

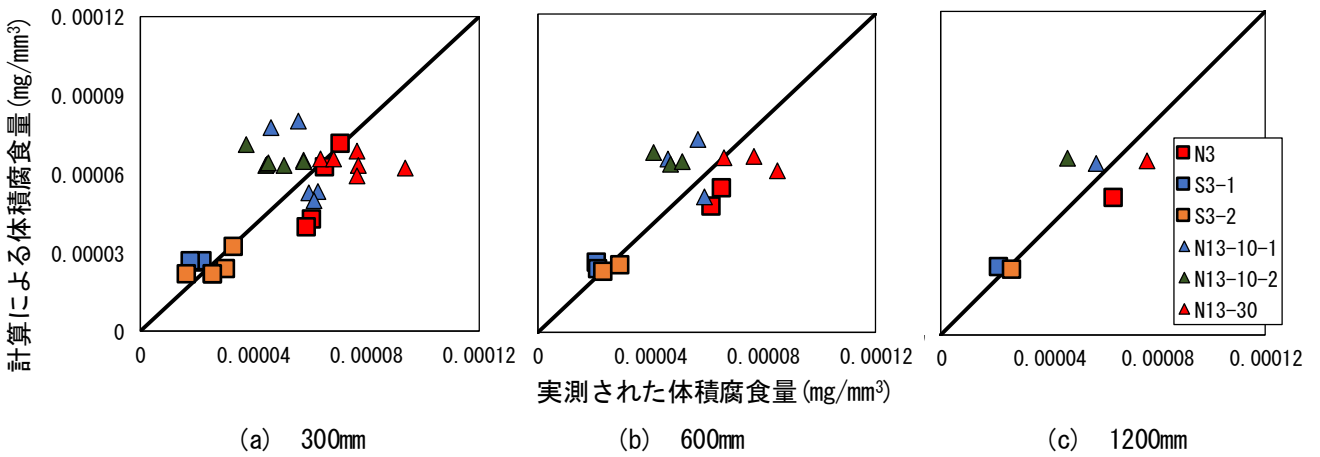


図-8 計算値および実測値の比較 ($c/s > 1.0$)

腐食膨張による腐食ひび割れの形成が、表面だけでなく内部ひび割れの形成にも費やされていることを示している。

4. RC 構造物の外観性状に基づく鉄筋腐食量の推定

本節では、3.4で提案した腐食量算定式により、実験で用いた供試体のコンクリート表面に発現した腐食ひび割れ性状から、鉄筋の腐食量を推定する。対象とした供試体は、3章の検討で用いた供試体とした。なお、 c/s が1.0未満の供試体は、今回の検討では単鉄筋供試体である。対象領域の設定範囲としては、供試体軸方向中央部から軸方向にそれぞれ300mm、600mm、1200mmの3パターンとし、幅および高さに関しては、各供試体の寸法と同様とし、対象領域を設定した。

図-7および図-8に、提案した算定式を用いて、供試体表面の腐食ひび割れ性状から計算された腐食量と実測された腐食量との比較を示す。なお、対象領域は左から順に300mm、600mm、1200mmの結果を示しており、図-7は、 c/s が1.0未満の供試体、

図-8は、 c/s が1.0以上の場合を示している。図より、 c/s が1.0未満の場合と比較して、 c/s が1.0以上の方が、対象領域を大きくしていく程算定値と実測値は良好に対応していることがわかる。この原因として、 c/s が1.0未満の場合に用いた供試体が単鉄筋であり、均一な腐食を導入していることが考えられる。これは、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を考える際、軸方向には150mm以上の大きさの空間領域を定量化の構成

単位として考えることが有効とした既往研究³⁾の結果と一致している。これらの結果より、対象領域を設定する場合には、部材軸方向に1000mm程度の区間を設定することが良いと考える。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 腐食ひび割れ性状と鉄筋腐食量の検討において、任意に設定した対象領域内の腐食ひび割れ性状と鉄筋腐食量を関係付けることにより、両者の関係は概ね線形関係となった。これより、材料劣化を数十センチ単位で平均化するメゾスケールモデルは、腐食ひび割れと鉄筋の腐食量を関係付ける際に有効な手段であるといえる。
- (2) 材料劣化の不均一性および内部ひび割れの形成による影響を考慮した、コンクリート中の鉄筋腐食量算定式を提案した。
- (3) 対象領域をRC部材軸方向1000mm程度に設定することで、腐食量の算定値は実測値と概ね一致した。

参考文献

- 1) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ85，2009.5
- 2) 西内達雄：コンクリート表面のひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定法，電力中央研究所報告，No.08024，2008
- 3) 村松真吾，小林 豊，下村 匠：鉄筋腐食の空間的不均一性が鉄筋コンクリート部材の耐荷性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2003
- 4) 岡崎雅弘，下村 匠，松尾 洋：鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，2003
- 5) 山口貴幸，小池耕太郎，下村 匠：コンクリート中における鋼材の腐食生成物の変形特性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，2018
- 6) 小池耕太郎，Isas Gomez Omar，木沢敬太，下村 匠：構造物表面における腐食ひび割れ発現の遅延に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，2018