

論文 電位拡散を考慮した腐食ひび割れ統合解析手法の構築に関する基礎的研究

青山 達彦^{*1}・上田 尚史^{*2}・中村 光^{*3}・国枝 稔^{*4}

要旨：コンクリート内部の電位分布性状の評価が可能なトラスネットワークモデルと腐食ひび割れ進展挙動の評価が可能な RBSM を統合した解析手法の構築を行った。構築した統合解析手法を電食試験に適用することで、解析手法の妥当性の検討を行うとともに、鉄筋腐食に及ぼすひび割れの影響について検討した。その結果、構築した解析手法は、ひび割れの影響による局所的な腐食性状を評価することができるとともに、鉄筋腐食によるコンクリート内部のひび割れ性状のみならず、表面ひび割れ幅の経時的な変化等のひび割れ進展挙動を概ね妥当に予測することができることを示した。

キーワード：3D-RBSM, トラスネットワークモデル, 電位拡散, 腐食ひび割れ

1. はじめに

鉄筋腐食による構造物の劣化は、鉄筋そのものが損傷するため、構造物の安全性が大きく低下することが懸念されている。近年では、鉄筋腐食が原因で構造物が崩壊する事例も報告されており、鉄筋腐食による構造物の損傷・劣化を適切に評価することは、耐久性の問題のみならず、安全性評価の観点からも非常に重要な課題となっている。

これまでに、鉄筋腐食を対象とした研究は、様々な角度から多くの検討がされている。例えば、中性化速度や塩化物イオン濃度の拡散速度に支配されている潜伏期の研究¹⁾、進展期の電気化学的な鉄筋腐食の研究²⁾、進展期・加速期の腐食ひび割れの進展挙動に関する研究³⁾、等が挙げられる。しかし、それらの研究はそれぞれ個別の事象を取り扱ったものであり、鉄筋腐食に関わる挙動を統一的に評価する研究は行われていないのが現状である。その原因としては、鉄筋腐食を統一的に評価するためには、物質拡散の問題、電気化学的な問題、力学的な問題といった、異なる物理現象を考えなければならず、また、それぞれの現象を考えるスケールは、 10^9 から 10^1 (m)のオーダーまでを取り扱う必要があるためである。一方で、鉄筋腐食の問題が顕在化するの、ひび割れのスケール (10^{-4} (m)程度)であることから、現実的には腐食ひび割れ進展挙動を適切に評価することが求められている。

一方、近年コンクリートの劣化現象に関する諸問題とそれらが構造挙動に及ぼす影響を統一的に扱う耐久性力学といった考え方が提唱され、異なる現象を統一的に扱う試みがなされている⁴⁾。著者ら⁵⁾は、不連続体力学の1つである Rigid Body Spring Model (RBSM) と物質移動解

析に適したトラスネットワークモデルを統合した解析手法を用いて、コンクリート中の物質移動とそれに伴い生じるコンクリートの体積変化等を考慮することで、温度応力問題や乾燥収縮問題に対して一定の成果を上げている。拡散方程式と運動方程式を統合した解析手法を用いることの利点とその可能性が示された例であるといえる。

そこで本研究では、鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化問題を対象として、潜伏期・進展期から加速期・劣化期までを統一的に評価可能な解析手法の構築を目的として、電位拡散を考慮した腐食ひび割れ統合解析手法の構築を試みた。具体的には、コンクリート内部の電位分布性状の評価にはトラスネットワークモデルを用い、腐食ひび割れ進展挙動評価には RBSM を用いることとし、両者を統合した解析手法の構築を行った。また、電食実験を対象として、構築した統合解析手法の妥当性と適用性の検討を行うとともに、鉄筋腐食に及ぼすひび割れの影響について考察した。

2. 解析手法

2.1 3次元剛体-バネモデル (3D-RBSM)

本研究では、ボロノイ分割⁶⁾を用いたランダムな要素形状を有する3次元 RBSM によりコンクリートをモデル化した。RBSM では、連続体は剛体要素の集合とみなされ、それぞれの要素は剛体要素境界面に配置された長さ0のバネによって連結されている。図-1に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に6自由度の3次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する(垂直バネが1個、せん断バ

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士(工) (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工) (正会員)

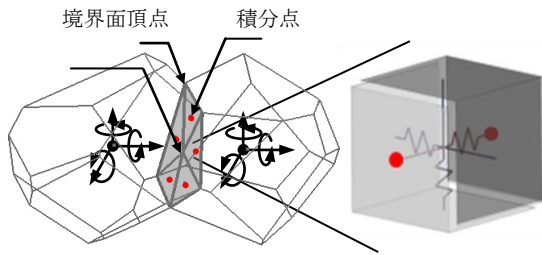


図-1 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

ネが 2 個)⁷⁾。本モデルでは、一つの境界面に対し複数の垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置することにより、回転バネを導入することなく、回転バネの非線形性に相当する挙動を簡便に評価できる。

2.2 コンクリートの構成モデル

コンクリートの引張挙動は図-2(a)に示すように応力が引張強度 f_t に達するまでは弾性とし、その後は、破壊エネルギー G_F によって軟化勾配を変化させる 1/4 モデルに従って応力を低減させた。圧縮挙動に関しては、図-2(b)に示すように圧縮強度 f_c までは、放物線で上昇し、その後、圧縮破壊エネルギー G_{F_c} を考慮した軟化勾配によって応力を低減させるモデルとした⁸⁾。せん断バネには、モール・クーロン型の破壊基準⁹⁾を用い、降伏後は関連流れ則に従い、終局せん断ひずみに達するまで降伏曲面上を移動するものとして、コンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。また、ひび割れ開口に伴うせん断伝達特性の劣化を表現するために、ひび割れ幅に対してせん断剛性を低減させた。

2.3 トラスネットワークモデル

コンクリート中の電位分布を評価する手法として、不連続体挙動を表現する RBSM と統合可能なトラスネットワークモデル⁵⁾を用いた。本モデルは、図-3に示すように各ボロノイ母点間を結ぶ 3 次元のトラスネットワークを設定し、各トラス間の一次元の物質移動問題を解くことで簡易に 3 次元空間内の物質移動を評価できる手法である。既往の研究⁵⁾では、拡散方程式を解くことで温度や湿度等の非定常な物質移動を評価可能であることが確認されている。本研究では、任意時刻の静電場を評価することを目的とし、拡散方程式における時間項を無視したラプラス方程式を解くことで、コンクリート内部の電位分布の評価を行った。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 ϕ は電位 (V)、 D は電気伝導率 ($1/(\Omega \text{ cm})$) である。

トラスネットワークモデルにおいては、トラス要素はボロノイ要素境界面の面積に対応した断面積を持つものとする。また、ひび割れが生じた後は、図-3に示すように、ひび割れ部にもトラス (境界面トラス) を配置し、

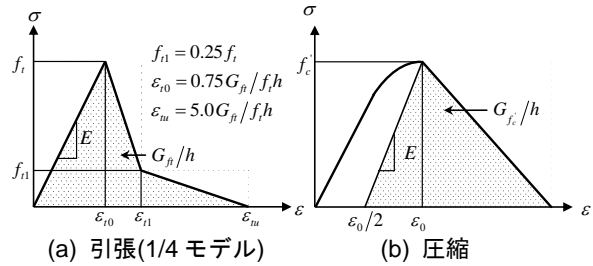


図-2 垂直ばねの応力-ひずみ関係

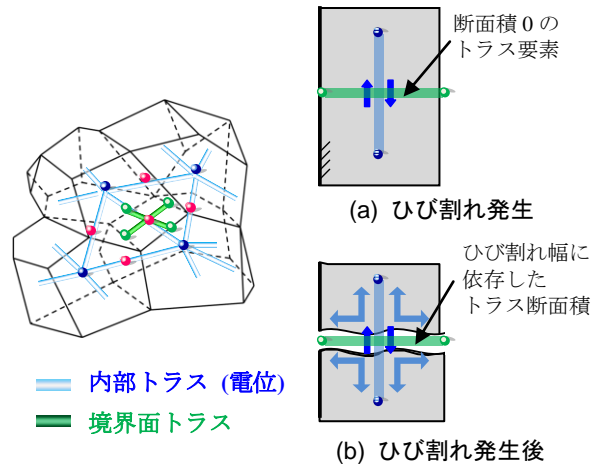


図-3 トラスネットワークモデルの概要

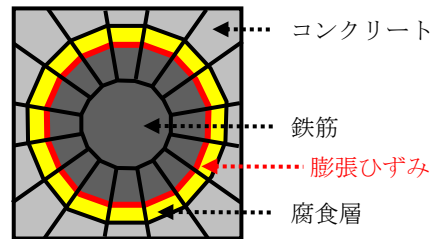


図-4 腐食層のモデル

コンクリートとは異なる電気伝導率を設定することでひび割れ部への電流の流入を考慮可能としている。ひび割れ部に設定する電気伝導率については 3 章で詳述する。

2.4 鉄筋の腐食膨張モデル

鉄筋の腐食膨張は、鉄筋表面の腐食層が膨張することでモデル化した。すなわち、図-4に示すように鉄筋とコンクリートの間に腐食層をモデル化し、鉄筋と腐食層の要素境界面上に配置されている垂直バネに自由膨張ひずみを初期ひずみとして作用させることで、腐食膨張をモデル化した。腐食層の厚さ H 、自由膨張量 U とすると、自由膨張ひずみ ϵ_{free} は次式のように表される。

$$\epsilon_{free} = \frac{U}{H} \quad (2)$$

自由膨張量 U は鉄筋の腐食量 W_r (mg/cm^2) を用いて、次式により算定される¹⁰⁾。

$$U = \frac{W_r (dV - 1)}{\rho_s} \quad (3)$$

ここで、 ρ_s は鉄の密度($=7.85 \times 10^3 \text{ mg/cm}^3$), dV は腐食生成物の体積膨張率($=2.5$)である。

腐食層のヤング係数や厚さについては、腐食生成物の特性に大きく関係することが考えられるが、明確な物性を評価することは困難である。本研究では、Tran らの研究¹¹⁾を参考に、ヤング係数を 500 N/mm^2 、腐食層の厚さを 1.0 mm (一定) とした。なお、本解析では腐食生成物のひび割れへの浸透を考慮しないため、腐食膨張圧は過大に作用することとなる¹¹⁾。

2.5 解析フロー

本研究は、前述の 3D-RBSM とトラスネットワークモデルを統合することで、腐食ひび割れ進展挙動を鉄筋の腐食過程から経時的に評価するものである。図-5 に本研究で開発した統合解析手法の解析フロー図を示す。

解析は、トラスネットワークモデルを用いた電位拡散解析により、ラプラス方程式を解くことでコンクリートおよび鉄筋内の電位分布を計算する。得られた定常状態の電位分布から、オームの法則により、腐食電流密度 I_{corr} が算定される。

$$I_{corr} = \frac{\Delta\phi}{R} \quad (4)$$

ここに、 R は腐食層の電気抵抗率である。また、鉄筋の腐食量 W_r はファラデーの法則により、腐食電流密度を用いて次式により算定される。

$$W_r = \frac{I_{corr} \cdot t \cdot M}{n \cdot F} \quad (5)$$

ここに、 t は時間(s), M は鉄の原子量, n は鉄イオンの当量(mol eq.), F はファラデー定数(C/mol eq.)である。

得られた腐食量から式(2), (3)を用いて自由膨張ひずみを算出し、初期ひずみ問題として RBSM により内力計算を行う。腐食膨張圧により生じたコンクリートの応力が引張強度を超えると、コンクリートにひび割れが生じることとなる。内力を計算した後、収束判定を行い、条件を満たさない場合は、繰り返し計算を行い、条件を満たす場合は次のステップへ進む。

なお前述のように、本解析手法ではコンクリートのひび割れ部に境界面トラスを配置することで、ひび割れ部への電流の流入を考慮可能である。

3. 電食試験を対象とした腐食進展解析

3.1 解析対象

河村らが行った電食試験¹²⁾を対象として、提案した解析手法の妥当性の検討を行う。図-6 に実験供試体の概要を示す。供試体は断面 $150 \times 150 \text{ mm}$ 、長さ 200 mm の角柱供試体であり、異型鉄筋 D19 がかぶり 30 mm で 1 本配置されたものである。電食試験は、電解液に 3%塩

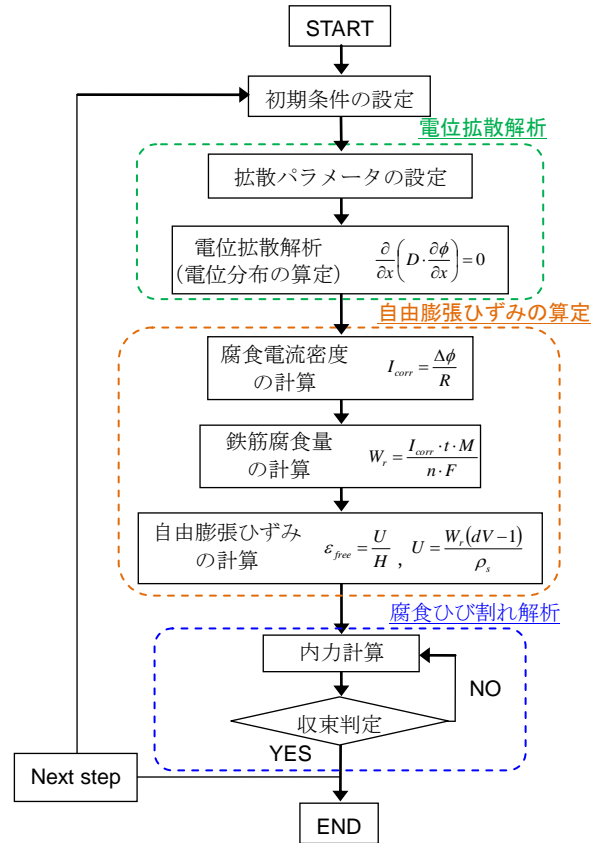


図-5 解析フロー図

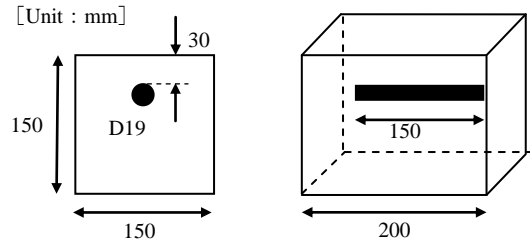


図-6 実験供試体概要

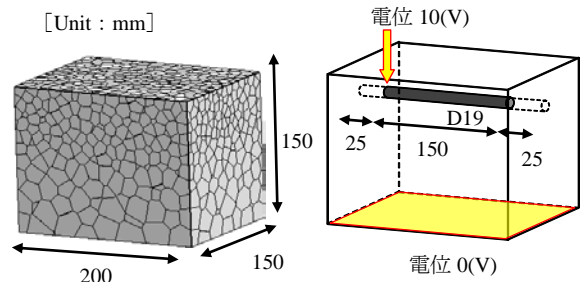


図-7 解析モデル

化ナトリウム水溶液が用いられ、鉄筋側をアノード極、銅板側をカソード極に接続し、定電流電源装置により電流密度 0.9 mA/cm^2 の電流を通電している。実験では、腐食量と表面ひび割れ幅の関係や、コンクリート内部のひび割れ進展挙動について検討されている。

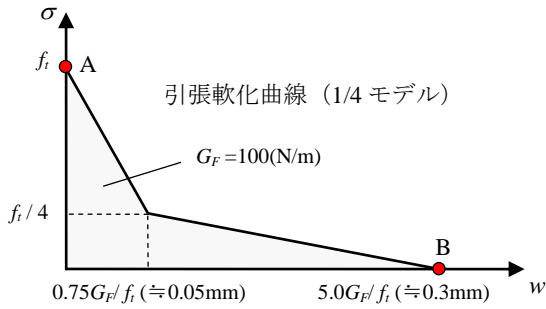


図-8 電位拡散を考慮するひび割れ幅の閾値

3.2 解析概要

(1) 解析モデル

図-7 に解析モデルを示す。鉄筋は円柱形を模した多角形により規則的に分割し、鉄筋の外周には前述したように厚さ 1 mm の腐食層をモデル化した。コンクリートは、ひび割れ進展の要素形状依存性を低減させるために Voronoi 多角形により分割した。また、ひび割れ進展挙動を詳細に評価するため、鉄筋周辺の要素寸法を小さくし、最小要素寸法を 5 mm とした。

コンクリートの材料定数は、実験値を用いることとし、弾性係数を 21.7 kN/mm²、圧縮強度を 18.5 N/mm²、引張強度を 1.53 N/mm² とした。破壊エネルギーは、100 N/m を仮定した。鉄筋のヤング係数は、200 kN/mm² とした。腐食層のヤング係数は、前述したように 500 N/mm² と仮定した。電位拡散解析における電気伝導率は、コンクリートおよび腐食層では、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ 1}/(\Omega \text{ cm})$ 、鉄筋では、 $1.0 \times 10^5 \text{ 1}/(\Omega \text{ cm})$ を仮定した。

電位拡散解析における境界条件は、図-7 に示すように、鉄筋端部の節点に電位 10 V を与えるとともに、供試体底面の節点の電位を 0 V とすることで、電食実験におけるアノード極、カソード極を模擬した。

本研究では、ひび割れの存在が鉄筋腐食性状ならびに腐食ひび割れ進展挙動に及ぼす影響を検討するため、ひび割れ部の電位拡散を考慮しない解析 (Case1) と、ひび割れ部の電気伝導率を $1.0 \times 10^1 \text{ 1}/(\Omega \text{ cm})$ と仮定した解析 (Case2, Case3) を行った。ひび割れ部の電位拡散を考慮しない場合は、境界面トラスを配置せず、ひび割れの影響を無視した解析条件で解析を行った。また、ひび割れ部では湿潤状態であると仮定し、コンクリートの 10^3 倍の電気伝導率を設定した。なお、応力が引張強度に達した以降 (以下、微細ひび割れ) に考慮する場合 (case2) と応力が 0 になる点以降 (以下、マクロなひび割れ) に考慮する場合 (case3) を想定し、それぞれ、図-8 中の A 点、B 点以降に境界面トラスを設置し、両者の違いについて検討する。

3.3 解析結果と考察

(1) 電位分布性状の比較

図-9 に、腐食量 46 および 200 mg/cm² 時の電位分布性状を示す。図より、ひび割れ部の電位拡散を考慮しない解析とマクロなひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、鉄筋を中心として同心円状に電位が低下しており、腐食量が増加してもその傾向は変化しない。一方、微細ひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、腐食量が 50 mg/cm² 以下の場合においては、鉄筋近傍において局所的に電位が大きくなっており、腐食量が増加することでその領域は広範囲になることが確認できる。

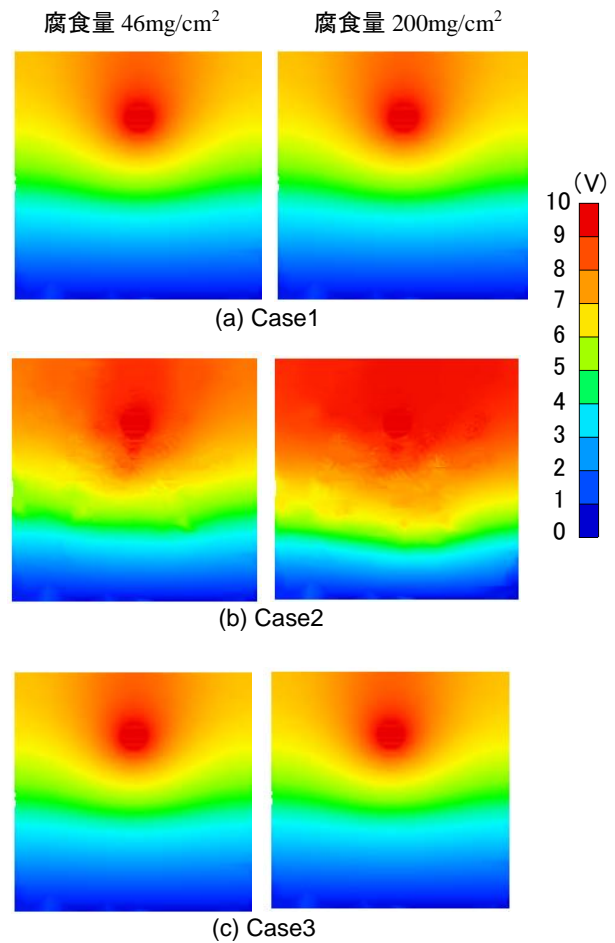


図-9 電位分布性状

(2) 内部ひび割れ性状の比較

図-10 に、腐食量 46, 200 および 800 mg/cm² 時の供試体中央断面におけるひび割れ性状を示す。図中の緑色は、ひび割れ幅が 0.0~0.05 mm の範囲であること、赤色はひび割れ幅が 0.3 mm 以上であることを示す。図より、腐食量 46 mg/cm² のときは、コンクリート内部には 0.05mm 以下の微細なひび割れのみが生じていることが分かる。微細ひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、それら微細なひび割れにおいて電位拡散が生じるため、図-9 で示したように内部の電位分布性状が一様でなくなる。また、微細ひび割れに対して電位拡散を考

慮した解析では、微細ひび割れが生じている範囲が小さいが、腐食量 200 mg/cm²以降のひび割れ性状をみると、明らかに損傷の程度は大きくなっており、腐食膨張が局所的に生じることで損傷が局所化したものと考えられる。

腐食量 46mg/cm² 腐食量 200mg/cm² 腐食量 800mg/cm²



(a) Case1



(b) Case2

図-10 供試体断面におけるひび割れ性状

(3) 断面内の鉄筋の腐食量分布

図-11に、腐食量 200 および 800 mg/cm²時の腐食による鉄筋の断面減少性状図を示す。ひび割れ部の電位拡散を考慮することで、断面の減少も局所的に生じていることが分かる。とりわけ、微細ひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、腐食量が増加するに従って、鉄筋のかぶり側において断面が著しく減少していることが確認できる。図-12に電食試験より得られた断面のひび割れ性状と鉄筋の腐食性状を示すが、微細ひび割れに対して電位拡散を考慮することで、実験の結果と同様の傾向が得られることが確認できる。

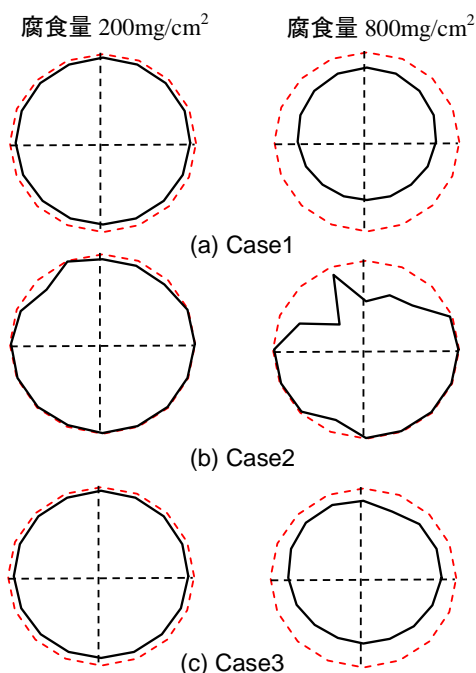
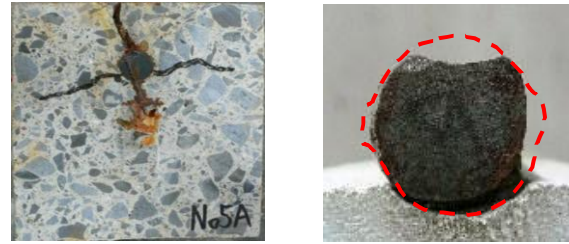


図-11 鉄筋の断面減少性状



(a) 断面のひび割れ (b) 鉄筋の腐食性状

図-12 電食試験結果

(4) 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

図-13に、解析より得られた腐食量と表面ひび割れ幅の関係を実験の結果と併せて示す。図より、実験では、ひび割れ発生後急激にひび割れ幅が増加し、その後は緩やかなものであった。ひび割れ部の電位拡散を考慮しない解析では、腐食量が 50 mg/cm²の時点で表面ひび割れ幅が発生し、その後は腐食量の増加に伴い単調にひび割れ幅が増加する結果となり、明らかに実験とは異なる挙動であることが分かる。一方、微細ひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、表面ひび割れ幅が発生する腐食量は大きくなったが、ひび割れ幅は急激に開口する結果となった。また、腐食量が 300 mg/cm²を境に、ひび割れ幅は緩やかに開口するようになり、ひび割れ部の電位拡散を考慮しない解析と比較して明らかに異なる傾向となった。実験と比較して表面ひび割れ幅の大きさは異なるもののひび割れ幅が増加する挙動を定性的に捉えていることが分かる。マクロなひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、表面ひび割れ幅が 1.5 mm 程度まではひび割れ部の電位拡散を考慮しない場合とほぼ同様の挙動であったが、その後は、緩やかにひび割れ幅が開口する結果となった。

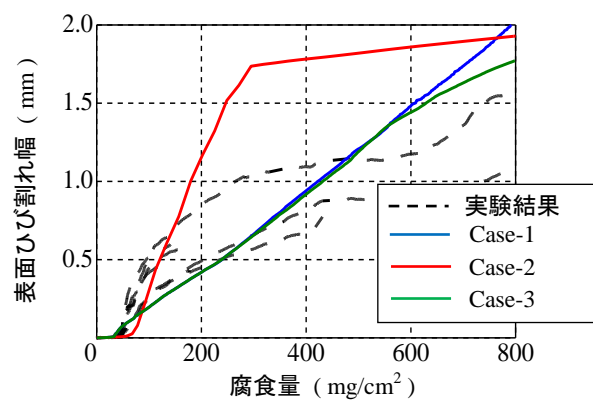


図-13 腐食量とひび割れ幅の関係

(5) 腐食膨張圧による断面の変形状

図-14に、腐食量 200, 400 および 800 mg/cm²時の断面の変形状を示す。ひび割れ部の電位拡散を考慮しない解析では、断面内の変形状はほぼ同程度であり、鉄筋位置から下方向にひび割れが生じる傾向が認められる。一方、微細ひび割れに対して電位拡散を考慮した解析では、鉄筋位置の水平方向のひび割れが開口する変形が卓

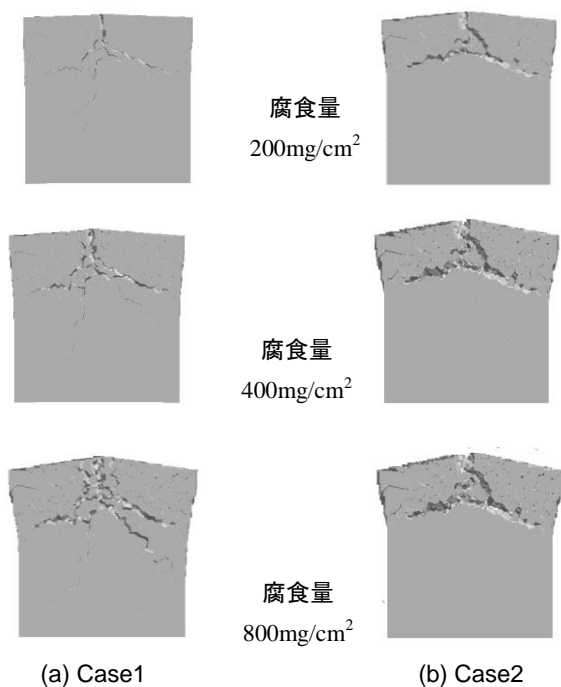


図-14 断面の変形性状

越していることが確認できる。水平方向のひび割れが開くように腐食膨張が卓越することで、図-13で見られたように表面のひび割れ幅の開口が緩慢になったものと推察される。

以上のように、本研究で構築した統合解析手法を用いることで、電位拡散からひび割れ進展挙動までを統一的に評価可能であることが確認できた。また、ひび割れ部における電位拡散を考慮することで、実験で見られるような鉄筋の腐食性状や、腐食ひび割れ性状を再現できることが示された。本研究の結果は、ひび割れ部の電位拡散は、マクロなひび割れのみならず微細ひび割れに対しても考慮する必要があることを示唆するものであった。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 電位拡散を考慮した腐食ひび割れ進展挙動評価手法として、トラスネットワークモデルとRBSMを統合した解析手法の構築を行った。ひび割れ部の電位拡散を考慮し、電食実験を対象とした解析を行った結果、断面のひび割れ性状、鉄筋の腐食性状および断面の変形性状は定性的に評価できており、構築した手法は、腐食ひび割れ進展挙動を妥当に評価できることを示した。

(2) 構築した手法では、いずれの結果においても定性的には評価できているが、定量的に評価するには至らなかった。これはひび割れ部の電気伝導率の値が適切な値ではないことや、酸素の影響を考慮していないことが挙げられる。今後は、適切なパラメータの同定および酸素の影響を考慮する必要がある。

今後は、自然環境下における鉄筋腐食を対象とした解析を行い、解析手法の高度化を行う予定である。

参考文献

- 1) 氏家勲, 檜崎正尚, 長瀧重義: コンクリートの透気性状と酸素および塩素イオンの拡散性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, pp.519-524, 1993.
- 2) 宮里心一, 大即信明, 佐伯竜彦: 分極曲線を用いた断面修復部のマクロセル腐食速度予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.865-870, 1998.
- 3) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.533/V-30, pp.159-166, 1996.
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の耐久性力学, WG 報告書・シンポジウム論文集, 2007.
- 5) Nakamura, H., Worapong, S., Yashiro, R. and Kunieda, M.: Time-Dependent Structural Analysis Considering Mass Transfer to evaluate Deterioration Process of RC Structures, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.147-158, 2006.
- 6) Bolander, J. and Saito, S.: Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998.
- 7) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008.
- 8) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete. In: Modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic loads. ASCE, pp.471-487, 2001.
- 9) Saito, S. and Hikosaka, H.: Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network model, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.627 V-44, pp. 289-303, 1999.
- 10) 松尾豊史, 西内達雄, 松村卓郎: 鉄筋の腐食膨張に伴うひび割れ進展解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.99-104, 1997.
- 11) TRAN, K. K., Nakamura, H., Kawamura, K. and Kunieda, M.: Quantitatively evaluation of crack propagation due to rebar corrosion, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1043-1048, 2010.
- 12) 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1075-1080, 2009