# 論文 鉄筋コンクリート部材のひび割れ部における腐食速度の解析

長谷川 裕介\*1·宮里 心一\*2·親本 俊憲\*3·横関 康祐\*4

要旨:鉄筋コンクリートのひび割れ部では、マクロセルが形成され、局所的に顕著な腐食が進行する。これに対して、マクロセルを考慮した鉄筋腐食速度解析モデルが提案されており、1次元モルタル供試体を用いた検証がなされている。本研究では、このモデルの実用化を図るため、モルタルではなくコンクリートを用いた検証実験、さらに1次元ではなく3次元供試体に対する適用実験を実施した。その結果、腐食速度の長期照査に役立つ解析モデルが構築された。

キーワード: 塩害,腐食速度解析モデル,コンクリート,3次元,マクロセル,ミクロセル

## 1. 序論

鉄筋コンクリートの合理的な維持管理は、持続的発展を唱える社会の中で、特に重要な社会基盤整備事業のひとつである。特に塩害によるコンクリート中鉄筋の腐食は、10年程度の早期においてさえも生じる劣化であり、数々の対策が講じられている。

ここで、日常の生活で使用する商品に対する、一般的なユーザーの購入判断の手順について、整理する。例えば、大切に長期間にわたり使用する衣服の購入に対しては高額を支払うが、一方短期間のみ使用する軽装用の衣服に対しては小額を支払うであろう。また、食品の賞味期限が短くなれば、店頭にて値下げされることがある。この様に、ユーザーは、寿命と価格を基に、購入を判断するケースが少なくない。したがって、鉄筋コンクリート部材においても、LCCの算出などを踏まえた合理的なマネジメントのためには、物理的な供用期間と価格の関係を整理すべきと考えられる。

現在,鉄筋コンクリート部材における物理的 供用期間や価格を工学的に定めるために,多数 の検討が進められている。例えば,腐食発生時 期を予測するため,塩化物イオンの浸透を考慮 した方法が、コンクリート標準示方書に明示されている。さらに、発錆後の腐食速度を予測できるようになれば、現時点における寿命予測よりも確実に供用期間を評価できると考えられる。その結果、材料の設定や断面形状の算定などの新設時の設計に役立たせるとともに、適切なタイミングでの点検時期の設定にも役立たせることができる。

上述の背景の下、曲げひび割れなどの欠陥を 有する部材を対象として、マクロセル腐食速度 を解析するモデルを提案し、さらに1次元モル タル供試体を用いて、モデルの妥当性を検証し た<sup>1)</sup>。しかしながら、一般的な実部材は主筋とス ターラップを有するコンクリート梁であること から、いくつかの課題が残されていた。

以上の背景を踏まえ本研究では、ひび割れを 有する鉄筋コンクリート供試体に対して、既提 案の鉄筋腐食速度解析モデルを適用する。これ により、モルタルだけではなくコンクリートに 対するモデルの適用可能性を確認し、また 3 次 元部材に対するモデルの適用可能性を確認する。

# 2. モデルの概要

モデルの概要を説明する。なお,詳細につい

<sup>\*1</sup> カジマ・リノベイト(株) (元金沢工業大学大学院)修士(工学) (正会員)

<sup>\*2</sup> 金沢工業大学助教授 環境・建築学部環境土木工学科 博士(工学) (正会員)

<sup>\*3</sup> 鹿島建設(株)主任研究員 技術研究所建築生産グループ 修士(工学) (正会員)

<sup>\*4</sup> 鹿島建設(株)上席研究員 技術研究所土木構造・材料グループ 博士(工学) (正会員)

ては文献 1) に記す。

モデルのアウトプットデータは「腐食速度」である。一方、インプットデータは「アノード 分極曲線」、「カソード分極曲線」、「分極抵抗」 および「コンクリート比抵抗」である。

また、マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度を区別して解析するため、鉄筋を要素に分割する。すなわち、**図-1**に示すとおり、一本の鉄筋は複数の鉄筋要素の連続体として考える。また、アノードとカソードが、単一の鉄筋要素内に存在する場合を「ミクロセル」とし、一方異なる鉄筋要素に跨る場合を「マクロセル」とする。

さらに、具体的な解析手順について、図-2に て説明する。なおこの図は、アノード分極曲線 およびカソード分極曲線の組合せとマクロセル 腐食電流およびミクロセル腐食電流の関係を示 すものである。(a)図に示すとおり、鉄筋要素 1 はひび割れの無いコンクリート内部に存在し, 一方鉄筋要素2はひび割れと接すると仮定する。 また, アノード分極曲線とカソード分極曲線の 交点が電気化学的な平衡状態であり、この電流 値で腐食速度は制御される。ここで, (b)図に示 すとおり,同一鉄筋要素内にアノードとカソー ドが形成されるミクロセルの場合, 鉄筋要素の 分極抵抗に伴う電位ロスを考慮する必要がある。 すなわち, アノード分極曲線とカソード分極曲 線の交点よりも左側(腐食電流が小さい側)に おいて、式(1)のオームの法則を満足するミクロ セル腐食電流が流れる。

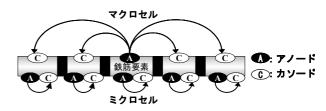
$$E_{C2} - E_{A2} = (Rp_2 + Rp_2) \times I_{micro} \tag{1}$$

ここで、 $E_{C2}$  および  $E_{A2}$ は、カソード分極曲線 とアノード分極曲線の交点から分極抵抗による 電位ロスを考慮した電位。 $R_{P2}$ は鉄筋要素 2 の分極抵抗( $\Omega$ )。 $I_{micro}$ はミクロセル電流。

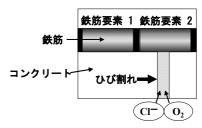
一方, (c) 図に示すとおり, 異なる鉄筋要素に 跨ってアノードとカソードが形成されるマクロ セルの場合, 鉄筋要素 1・2 間の分極抵抗やコン クリート比抵抗に伴う電位ロスも考慮する必要 がある。すなわち、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点よりも左側(腐食電流が小さい側)において、式(2)のオームの法則を満足するマクロセル腐食電流が流れる。

$$E_{C'2} - E_{A'2} = (Rp_1 + Rc_{1\cdot 2} + Rp_2) \times I_{macro}$$
 (2)

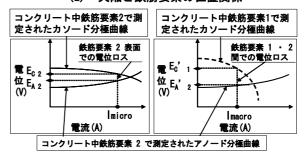
ここで、 $E_{C'1}$ および  $E_{A'2}$ は鉄筋要素 1(カソード) と 2(アノード) で形成するマクロセルにおいて、分極抵抗およびコンクリート比抵抗による電位ロス考慮した電位。 $R_{P1}$ は鉄筋要素 1 の分極抵抗( $\Omega$ )、 $R_{C1\cdot 2}$ は鉄筋要素 1 と 2 間のコンクリート比抵抗( $\Omega$ )。 $I_{macro}$ はマクロセル電流。



# 図-1 鉄筋の要素分割と腐食形態(マクロセル・ミクロセル)



# (a) 欠陥と鉄筋要素の位置関係



- (b) 鉄筋要素 2 で形成 されるミクロセル
- (c) 鉄筋要素 1 · 2 で形成 されるマクロセル

図-2 分極曲線と腐食電流の関係

# 3. 1次元コンクリート供試体に対する適用

# 3.1 実験概要

#### (1) 使用材料と配合

コンクリート供試体に使用した材料を**表-1**, コンクリートの配合を**表-2** に示す。水セメント 比は30%,50%および70%の3水準とした。

# (2) 供試体概要

供試体の概要を**図**-3に示す。2章に示すとおり、鉄筋軸方向に要素分割された腐食電流の解析値と、後述する(4)5)に示す方法により測定された実測値を直接比較するため、分割鉄筋を埋設した供試体を用いた。打設から24時間後に脱型し、材齢28日まで水中( $20^{\circ}$ C)において初期養生した。その後、一部の供試体では、3点曲げ載荷により曲げひび割れを生じさせた。ここで、残留開口幅は0.4mm あるいは0.1mm である。

その後、28 日間および 91 日間の塩害促進暴露を行った。すなわち、気中放置  $(20^{\circ}C, RH90\%)$ の際に 1 日 2 回の 3%食塩水を噴霧 (供試体 1 面当たり 600ml) した。

#### (3) 実験ケース

実験ケースを**表-3**に示す。2 水準のひび割れ, 鉄筋要素No. 曲げひび割れ 3 水準の水セメント比を設けた。なお, 1 水準に 対して 2 つの供試体を用いた。

# (4) モデルへのインプットデータの測定方法

# 1)アノード分極曲線

Ag/AgCl を参照電極とし、鉄筋要素の電位を 1mV/秒で強制的に貴へ変化させ、その時に流れ る電流を記録した。分極曲線の測定方法を**図ー4** に示す。なお、測定時における IR ドロップを考 慮し、鉄筋表面のみで反応する分極特性に起因 する分極曲線を求めた。すなわち、鉄筋要素表 面での分極抵抗による電位ロスと、対極である ステンレス板と鉄筋表面の間でのコンクリート 比抵抗による電位ロスを考慮した。

#### 2) カソード分極曲線

上述の1)と同様に、Ag/AgClを参照電極とし、 鉄筋要素の電位を1mV/秒で強制的に卑へ変化させ、その時に流れる電流を記録した。

## 3) 分極抵抗

**図-5** に示すとおり、交流インピーダンス法により、各鉄筋要素の分極抵抗を測定した。

#### 4) 鉄筋要素間のコンクリート比抵抗

**図-6** に示すとおり、交流インピーダンス法により、各鉄筋要素間のコンクリート比抵抗を

表-1 使用材料

| 項目      | 種類         | 特性                                  |  |
|---------|------------|-------------------------------------|--|
| セメント(C) | OPC        | 密度:3.16g/cm³,<br>比表面積:3270cm²/g     |  |
| 混和剤     | 高性能減水剤(SP) | ナフタリンスルホン酸系                         |  |
| 化化归剂    | AE 減水剤(AD) | リグニンスルホン酸系                          |  |
| 細骨材(S)  | 陸砂         | 密度:2.59g/cm³, 吸水率:2.83%<br>粗粒率:2.58 |  |
| 粗骨材(G)  | 砕石         | 密度: 2.64g/cm³, 吸水率: 1.4%            |  |
| 鉄筋      | 異形         | SD235, D10, 黒皮付き                    |  |

表-2 コンクリートの配合

| Γ | W/C  | s/a  | 質量(kg/m³) |     |     |     |           |     |
|---|------|------|-----------|-----|-----|-----|-----------|-----|
|   | (%)  | (%)  | W         | С   | S   | G   | 混和剤(g/m³) |     |
|   | (/0) | (/*) | **        | Ò   | 5   | )   | SP        | AD  |
|   | 30   | 45   | 179       | 597 | 704 | 864 | 4770      |     |
|   | 50   | 49   | 185       | 370 | 848 | 886 |           | 111 |
|   | 70   | 53   | 191       | 273 | 954 | 848 | _         | 821 |

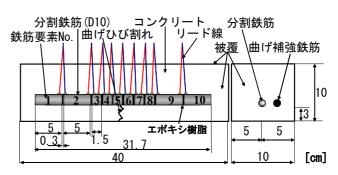


図-3 供試体概要

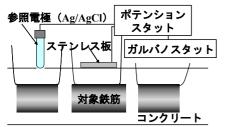
表-3 実験ケース

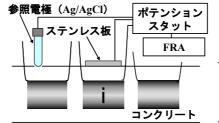
| No | ひび割れ幅(mm) | W/C (%) |
|----|-----------|---------|
| 1  | ひび割れ無し    | 50      |
| 2  | 0.1       | 50      |
| 3  |           | 30      |
| 4  | 0.4       | 50      |
| 5  |           | 70      |

測定した。

# 5) モデルのアウトプットデータと比較する ための腐食電流の実測値の求め方

文献<sup>2)</sup>を参考にして,単一の鉄筋要素内のみを 流れるミクロセル腐食電流および隣接する鉄筋 要素間を流れるマクロセル腐食電流を測定した。 また,測定されたマクロセル腐食電流とミクロ セル腐食電流の和を総腐食電流とした。





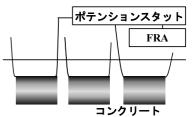


図-4 分極曲線の測定方法

図-5 分極抵抗の測定方法

図-6 コンクリート比抵抗 の測定方法

# 3.2 解析結果

# (1) 解析手順の例

塩害促進暴露期間 28 日目における, ひび割れ幅が 0.4mm で, 水セメント比が 50%の No.4 ケースにおける, 具体的な解析手順を紹介する。ここで, インプットデータの例を表-4, 図-7 および図-8 に示す。なお, 図-7 では, ひび割れが鉄筋と接していると予想される箇所, すなわち実測値の結果から腐食電流密度が最高となった鉄筋要素 3 および 4 を基点としたコンクリート比抵抗である。

先ずは 2 章に基づき、任意の鉄筋要素におけるアノード分極曲線とカソード分極曲線を重ねる。ここで、図-9 に示すとおりミクロセルを対象とする場合、同一の鉄筋要素におけるアノード・カソード分極曲線を用い、また分極抵抗の 2 倍をアノード・カソード間の電気抵抗として電位ロスを考慮する。一方、図-10 に示すとおりマクロセル腐食を対象とする場合、異なる鉄筋要素におけるアノード・カソード分極曲線を用い、両鉄筋要素の分極抵抗とモルタル抵抗の和をアノード・カソード間の電気抵抗として電位ロスを考慮する。以上の分極曲線の重ね合わせを全鉄筋要素において行い、各鉄筋要素間を流れる腐食電流を算出する。

さらに、鉄筋要素iにおけるマクロセル腐食電流密度は式(3)のとおり算定される。一方、鉄筋要素iにおけるミクロセル腐食電流密度は式(4)のとおり算定される。さらに、総腐食電流密度は、マクロセル腐食電流密度とミクロセル腐食電流密度の和として算定される。

マクロセル腐食電流密度 = 
$$\sum_{j\neq i} I_{(i,j)} \div Si$$
 (3)

表-4 分極抵抗のインプットデータ(No. 4)

| 鉄筋要素 No. | 分極抵抗(kΩ・cm²) |
|----------|--------------|
| 1        | 294.5        |
| 2        | 864.4        |
| 3        | 40.4         |
| 4        | 27.4         |
| 5        | 715.9        |
| 6        | 491.5        |
| 7        | 536.2        |
| 8        | 491.3        |
| 9        | 1791.7       |
| 10       | 1640.6       |

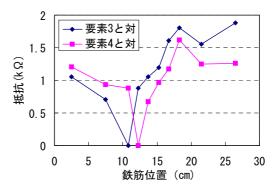
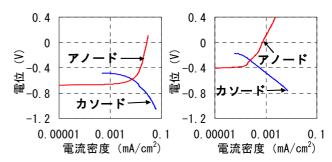


図-7 コンクリート比抵抗(No. 4)



(a) 鉄筋要素 4 (欠陥部) (b) 鉄筋要素 9 (健全部) 図-8 分極曲線のインプットデータ(No. 4)

ミクロセル腐食電流密度=
$$I_{(i,i)} \div Si$$
 (4)

ここで、鉄筋要素 i をアノードとし、鉄筋要素 j をカソードとする場合を、 $I_{(i,j)}$ とする。また、 $S_i$  は鉄筋要素 i の表面積( $cm^2$ )。

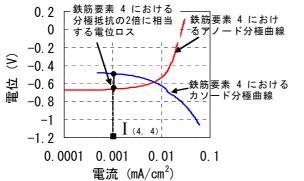


図-9 ミクロセル腐食電流の解析 (No. 4) (I<sub>(4,4)</sub>の算定, 鉄筋要素 4 の場合)

以上の結果をまとめ、各鉄筋要素の腐食電流 密度を**表−5** に示す。なお、100μA/cm<sup>2</sup>の腐食電 流密度は、1.16mm/年の腐食速度に換算できる<sup>3)</sup>。

腐食電流密度分布の解析結果を、**図-11** に示す。これによれば、マクロセル腐食電流密度およびミクロセル腐食電流密度ともに、ひび割れ部と予想される箇所で最高値を示していることが認められる。

# (2) 解析結果と実測結果の比較

図-12 に、暴露期間 28 日目および 91 日目の全実験ケースにおける全ての鉄筋要素での、総腐食電流密度の解析値と実測値を比較する。これによれば、解析値と実測値のオーダーはほぼ等しいことが認められる。すなわち、総腐食電流密度の解析値が 0.5μA/cm² 程度以下で低い場合、実測値は何れも 0.5μA/cm² 程度以下であり、腐食が進行していないことを表している。一方、総腐食電流密度の実測値が 10μA/cm²以上で高いとき、解析値と実測値の差は 3 倍以内で概ね精度を得られた。

# 4. 3次元コンクリート供試体に対する適用

## 4.1 実験概要

## (1) 使用材料と配合

3 次元コンクリート供試体に使用した材料は, 3 章に用いた材料と同様である。また,水セメント比が 50%の配合のみとした。

# (2) 供試体概要

供試体の概要を図-13に示す。また供試体作

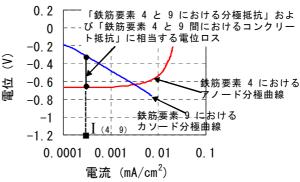


図-10 マクロセル腐食電流の解析 (No. 4) (I<sub>(4,9)</sub>の算定, 鉄筋要素 4 がアノードで 一方鉄筋要素 9 がカソードの場合)

# 表-5 解析された腐食電流密度(No.4)

 $(\mu A/cm^2)$ 

| 鉄筋要素 No | ミクロセル | マクロセル  | 総腐食電流密度 |
|---------|-------|--------|---------|
| 1       | 0.27  | -1.16  | 0.27    |
| 2       | 0.07  | -0.51. | 0.07    |
| 3       | 0.67  | 3.70   | 4.37    |
| 4       | 2.23  | 7.24   | 9.47    |
| 5       | 0.11  | -0.78  | 0.11    |
| 6       | 0.13  | 2.05   | 2.18    |
| 7       | 0.09  | -1.80  | 0.09    |
| 8       | 0.16  | -1.16  | 0.16    |
| 9       | 0.54  | -0.41  | 0.54    |
| 10      | 0.05  | -0.69  | 0.05    |

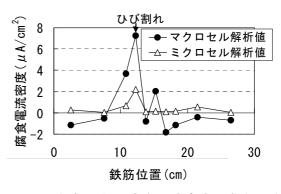


図-11 解析された腐食電流密度分布(No. 4)

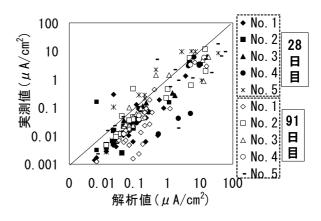


図-12 総腐食電流密度の実測値と解析値の比較

製状況を**図-14** に示す。供試体の作製方法および暴露方法は3章と同様である。また,3点曲げ載荷により曲げひび割れを生じさせ,残留開口幅は0.7mmである。なお,事項で述べるひび割れと予想される箇所の判定は,実測値として得られる分極抵抗の低い箇所をひび割れ箇所と判断した。

# 4.2 解析結果

解析手順は 3.2 と同様である。なお、3 次元 に配筋された分割鉄筋におけるマクロセル腐 食電流の測定方法については現在検討中であ る。したがって、ここでは解析値のみを示し、 3 次元部材へのモデルの適用可能性を検討した。

暴露期間 28 日目における全解析値を**図-15** に、また 2 本の主鉄筋における総腐食電流密度 分布の解析結果の例を**図-16** に示す。これらによれば、総腐食電流密度はひび割れ部と予想される箇所で最高値を示していることが認められる。したがって本モデルは実構造物を模擬した 3 次元コンクリート供試体に対しても、適用が可能である事が確認できた。今後は、実測値との比較を行い定量的に検証を行いたい。

# 5. 結論

ひび割れを有する鉄筋コンクリート部材を 対象としたマクロセル腐食速度およびミクロ セル腐食速度の解析モデルは、1次元コンクリ ート部材に対してのみならず、3次元コンクリ ート部材に対しても適用可能であることが検 証された。したがって、本モデルの実用化への 第一段階として、主鉄筋やスターラップなどを 含めた実部材において、本モデルを用いた長期 腐食速度照査が可能である事が示された。

## 参考文献

- 1) 長谷川裕介,宮里心一,親本俊憲,横関康 祐,ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐 食速度解析モデルの提案,コンクリート工学 論文集,第17巻,第1号,pp.31-40,2006
- 2) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐: 分割鉄を

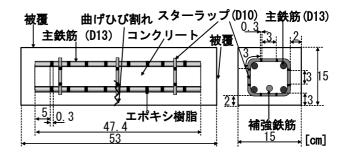


図-13 3次元供試体概要

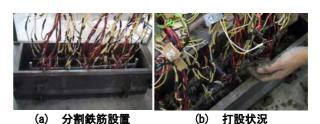


図-14 供試体作製状況

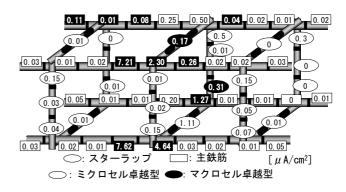


図-15 解析された全鉄筋要素の総腐食電流密度

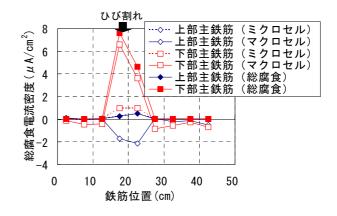


図-16 解析された腐食電流密度分布の例

用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理 論的検討,コンクリート工学年次論文集,第 23 巻,第 2 号, pp.547-552,2001

3) 腐食防食協会:腐食・防食バンドブック, p.572, 2000