

ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食に関する基礎的研究

Study on corrosion rate of reinforcing steel bar in cracked concrete

塚原 絵万*・魚本 健人**

Ema TSUKAHARA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

コンクリートにひび割れが生じると、ひび割れを通じて外部環境中の物質が容易に鉄筋に到達することとなり、鉄筋の腐食が進行し構造物の性能は著しく低下する。本研究では、塩害環境下における鉄筋コンクリートを対象とし、ひび割れ部の塩化物イオンの侵入機構を明白にすることを第一の目的とした。ひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体を用いて、健全部とひび割れ部の拡散浸透機構の違いを検討した。そして、ひび割れ部に境界条件を与えることの妥当性を解析により検討した。

また、コンクリート中の鋼材腐食においてひび割れ近傍の鋼材はアノードを形成することが知られているが、その形成過程をシミュレーションによって再現することを第二の目的とした。特に、塩化物イオンの拡散浸透に着目し、塩化物イオン濃度差による濃淡電池作用を考慮した鋼材腐食モデルを作成した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

本研究において用いたコンクリートの示方配合を表1に示す。また、スランプと空気量試験の結果および水中養生28日後の圧縮強度を表2に示す。

鋼材はSD 295 Aの異形鉄筋をアセトン脱脂後、黒皮付きのまま使用した。

2.2 供試体の作成

供試体は10×10×40 cmの型枠内にコンクリートを打設し、翌日脱型して材令28日まで温度20°Cで水中養生を行った。鉄筋は純かぶり20 mmとなるよう供試体の中心に鉄筋を配置している。その後、3点曲げ載荷により供試体下面の中央付近に曲げひび割れを設けた。ひび割れ開

口面を除く5面をエポキシ系樹脂により被覆し、腐食物質は1面のみから侵入するようにした。比較用の曲げ載荷を行なわない供試体についても同様に被覆を行った。供試体の形状を図1に示す。尚、鉄筋端部は極力防水し、供試体端部からの腐食開始を防いだ。

2.3 促進試験方法

促進試験は供試体材令35日から行い、3日間の乾燥および模擬海中への浸漬4日間を1サイクルとする乾湿繰り返し実験を13サイクルまで行った。塩水浸漬期間、乾燥期間ともに温度は一定である。模擬海水は濃度3±0.3%の塩化ナトリウム水溶液であり、乾燥時の相対湿度は60%とした。

表1 コンクリートの配合

Slump[cm]	Air[%]	W/C	W	C	S	G	SP
8	5	0.6	161	268	897	974	C*0.3%

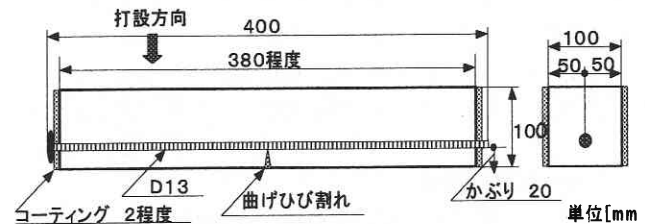


図1 共試体概要

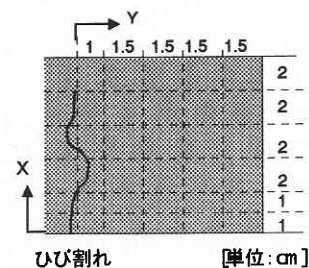


図2 試料の採取

*東京大学生産技術研究所 第5部
**東京大学国際・産学共同研究センター

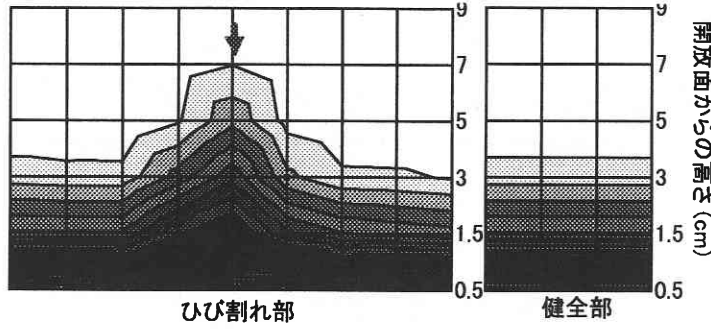


図3 塩化物イオンの浸透状況 (ひび割れ幅 0.09 mm)

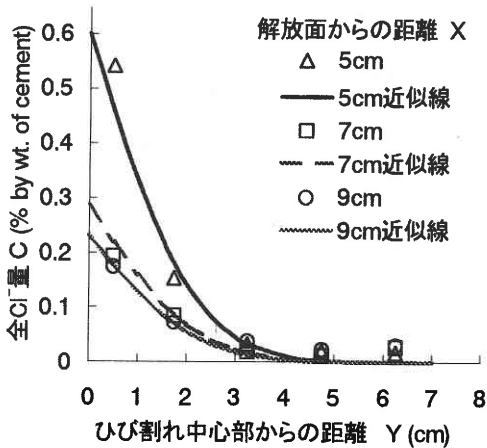


図4 ひび割れからのCl-浸透量実測データ

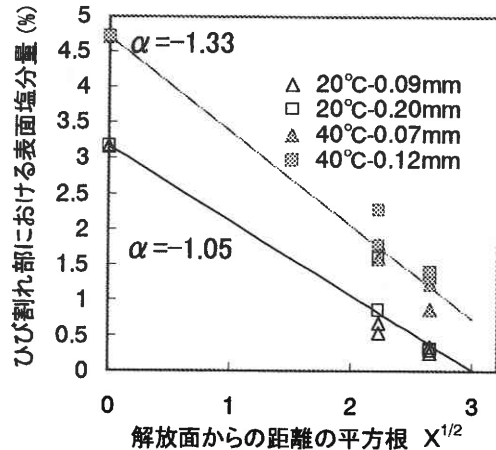


図5 開放面からの距離とひび割れ部における表面塩分量の関係

2.4 全塩化物量測定方法

測定試料は、供試体を割裂し鉄筋を取り除いた後、図2のように、割裂後の供試体半分をオイルカッターで切出して作成した。尚、ひび割れのない供試体については、供試体中央部分を同様に切出した。JCI-SC 4および5¹⁾を参考にして粉体試料および測定試料を作成し、簡易塩分分析計(東亜電波工業製)を用いて塩化物イオン量の測定を行った。

2.5 腐食程度の把握

照合電極に銀塩化銀電極を用い、各週毎に自然電位の測定を行うことによって、鉄筋の腐食程度を把握した。しかし、自然電位に基づく劣化診断は、測定時の腐食進行度を示す定性的なものに過ぎない。従って、小山²⁾を参考にして自然電位の変曲点を電流量解析により求め、鋼材のアノード領域とカソード領域の境界を把握し、電流量の積算値より腐食反応量を推定した。また、供試体割裂後、鉄筋の発錆面積を写し取り、画像解析にて腐食面積を測定した。

3. ひび割れからの塩化物イオンの拡散

図3に環境温度20°Cにおける促進13週後のひび割れ周辺部の塩化物イオン濃度分布を示す。ここで表記したひび割れ幅は、開放面における7点のひび割れ幅の平均値であり、濃度分布は図2に示した測定位置における塩化物イオン濃度を等高線にて表したものである。これより、ひび割れを有するコンクリートは内部まで塩化物イオンが浸透しやすくなっていることは明らかであり、ひび割れを中心として塩化物イオン濃度分布が形成されていることが分かる。従って、Fickの拡散法則によりひび割れからの塩化物イオンの拡散浸透を表現することを試みた。

Fickの第2法則において、境界条件を一定とすることにより、-拡散現象を見かけ上の拡散と見なして実測データを近似することが可能となる。本研究では表面塩分量 C_0 を式(1)の様に表した¹⁾。

$$C_0 = C(0, t) = S\sqrt{t} \quad C_0 : \text{表面塩分量}(\%)$$

$$S : \text{表面塩分量係数} \dots\dots\dots(1)$$

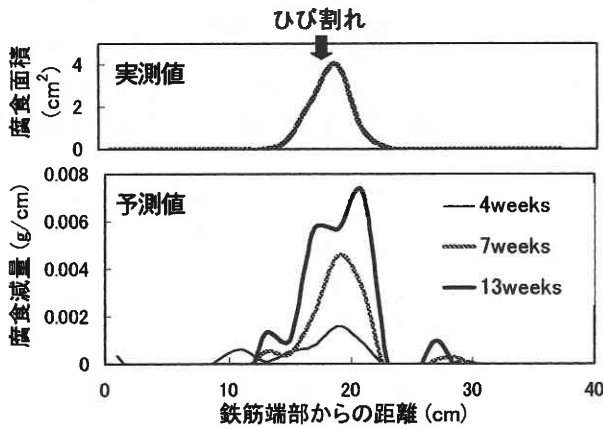


図6 腐食面積および腐食減量の分布

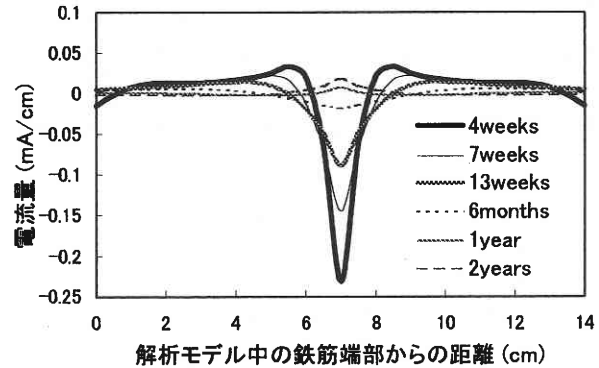


図7 電流量分布 (解析結果)

ひび割れの無い供試体の実測データを用いて近似を行った結果、Cl-拡散係数は $1.83 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、表面塩分量係数は 0.0011 となった。かぶりコンクリート中を浸透することと比較して、ひび割れを通ることにより塩化物イオンの浸透が容易になると考えると、ひび割れ部分は解放面とは異なった境界条件を有すると考えられる。図4に乾湿繰り返し実験13週を経たひび割れ周辺の塩化物イオン量実測データと近似線を示す。図中のXはひび割れ深さ方向、Yはひび割れに対して垂直方向を示す(図2参照)。解放面からのX方向への浸透、及び鉄筋位置における塩化物イオンの蓄積の影響を避けるため、 $X = 4 \sim 10 \text{ cm}$ までをひび割れ部分からの浸透と見なした。近似の際、Cl-拡散係数はひび割れの無い供試体と等しく、コンクリート中で一定とした。図4より、拡散係数を一定とした近似は妥当であり、ひび割れ部分の表面塩分量は内奥部に向かうほど小さくなるのが分かる。図5に各ひび割れ供試体におけるを示す。これより、ひび割れ部分の表面塩分量は解放面からの距離の平方根と良い相関を示し、式(2)の様に表すことができる。

$$C_c(X, t) = \alpha \sqrt{x} + S\sqrt{t}$$

α : 係数 (ひび割れ有り $\neq 0$, 無し $= 0$)
 C_c : 開放面から Xcm のひび割れ部における
 表面塩分量 (%)(2)

同じ乾湿繰り返し条件で環境温度を 40°C とした試験体のデータも図中に掲載した。係数 α は境界条件のひび割れ内奥方向への減衰を表す係数であり、本実験の範囲内では、ひび割れ幅よりも環境温度の影響を受けやすいといえる。

4. ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋の腐食

電流量解析を用いて得られた、環境温度 20°C のひび割れ幅 0.09 mm 供試体の促進13週における腐食面積と腐食減量の経時変化を図6に示す。供試体割裂後に腐測定した腐食面積と自然電位の経時変化から予測した食減量の位置はほぼ一致しており、腐食はひび割れを中心として起こったことが分かる。本研究では、にひび割れ周囲の塩化物イオンの拡散浸透に着目し、それがひび割れ周囲の鋼材腐食に及ぼす影響を解析的に検討した。

塩分濃度と自然電位はよい相関を有し、また、電位差は腐食電池の起電力に相当するものであり、その変化量は腐食に直接関係するパラメータと考えられる。従って、まず、前節に示した様に、促進試験より得られた境界条件及び拡散係数をもとに、有限要素法を用いて塩化物イオンの2次元拡散解析を行った。そして、次式³⁾を用いて各点における自然電位Eを求めた。

$$E = -a \times \ln(\text{NaCl wt\%}) - b$$

E : 電位(V), NaCl : コンクリートに対する塩分 (NaCl)の重量%濃度
 a, b : 係数(3)

図7に拡散解析の結果得られた各期間毎の電流量の分布を示す。ひび割れ部は初期はアノードとして働くが、次第にカソードに移行していく結果となった。同時にひび割れから離れた箇所はアノードとなり、初期と比較して非常に緩やかだが腐食を開始することが分かる。Cl-拡散解析結果より考察すると、初期はひび割れの存在によって鋼材位置に置いて極端な濃度差が生じ、結果として大きな起電力

研 究 速 報

が働くが、次第に濃度が均一になり腐食速度が低下したということが考えられる。腐食現象は各腐食因子の供給とバランスによるものであり、濃度差のみを考慮する場合、定量的な結果は得られない。しかし、以上の結果より、鉄筋コンクリート中にひび割れがある場合、塩化物イオンの濃度差は起電力となるために腐食初期に特に影響を及ぼすことが考えられる。

5. ま と め

ひび割れを有する鉄筋コンクリート中の塩化物イオン浸透および鉄筋腐食について、本研究より得られた成果を以下に示す。

- 1) ひび割れを通じた塩化物イオンの見かけの拡散を考える場合、開放面以外にひび割れ部にも境界条件を与える必要がある。
- 2) ひび割れ部の境界条件となる表面塩分量はひび割れ幅よりも環境温度に影響を受け、解放面からの距離の平方根と直線関係で表せる。
- 2) 腐食因子の中で特に塩化物イオンの働きについて考える場合、ひび割れの存在による塩化物イオンの濃度差が起電力となり、それは特に腐食初期に大きく作用する。

謝 辞

本研究を行うにあたりご協力頂いた魚本研究室助手 加藤佳孝氏、同技術官 星野富夫氏、芝浦工業大学 中山直基君に感謝の意を表します。

(1999年8月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 丸屋剛・宇治公隆：コンクリートへの塩分拡散浸透に関する表面塩分量の定式化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11, No.1, pp597-602, 1989.
- 2) 小生理恵，矢島哲司，魚本健人，星野富夫：自然電位を用いた鉄筋腐食状態の推定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.550 / V-33, 13-22, 1996.11.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書，1996.