

V-314

ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に関する基礎的研究

東京大学大学院 学生会員 塚原絵万

東京大学国際・産学共同研究センター F 会員 魚本健人

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、ひび割れを通じた塩化物イオンの拡散浸透及びひび割れを有するコンクリート中の鉄筋の腐食現象の評価を試みた。

2. 実験概要

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。鋼材は SD295A の異形鉄筋 D13 をアセトン脱脂後使用した。図-1 に示す供試体は材令 28 日まで水中養生を行った後、3 点曲げ载荷により下面中央付近に曲げひび割れを設けた。腐食物質の一方からの浸入を考慮するために、ひび割れ開口面を除く 5 面をエポキシ型樹脂により被覆し、3 日間の乾燥および 4 日間の模擬海水への浸漬を 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、乾燥期間ともに環境温度は一定である。模擬海水は濃度 $3 \pm 0.3\%$ 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。試験期間中は各週毎に自然電位の測定を行った。促進試験終了後、供試体を図-2 のようにオイルカッターで切出し、コンクリート中の全塩化物イオン量を塩分分析計(東亜電波工業製)を用いて測定した。

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%

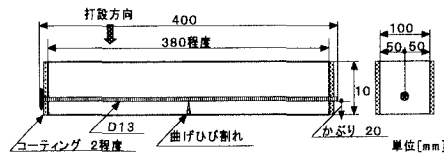


図-1 供試体概要

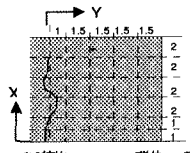


図-2 試料の採取

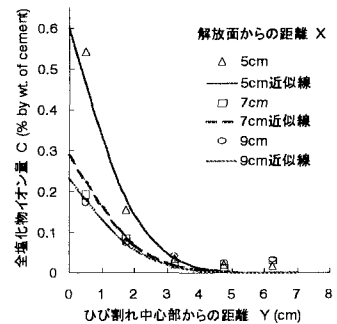


図-3 実測データの近似

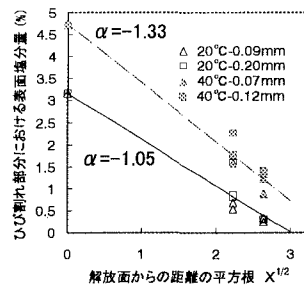


図-4 ひび割れ部の表面塩分量と解放面からの距離の関係

3. ひび割れ周辺部の塩化物イオンの拡散

Fick の第 2 法則において、表面塩分量に相当する境界条件を一定とすることにより、Cl 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⁾。

$$C_0 = C(0, t) = S\sqrt{t} \quad C_0: \text{表面塩分量}(\%), S: \text{表面塩分量係数} \quad \dots(1)$$

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 Cl 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-3 に乾湿繰り返し実験 13 週を経たひび割れ周辺の Cl 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 Cl 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-3 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

キーワード: ひび割れ, 塩化物イオン, 拡散浸透, 境界条件, 鉄筋腐食

〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1 東京大学生産技術研究所第 5 部 tel.03-3402-6231 (内線 2543)

さくることが分かる．図-4 に各ひび割れ供試体における解放面からの距離と表面塩分量との関係を示す．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．

$$C_c(x,t) = \alpha\sqrt{x} + S\sqrt{t} \quad \alpha: \text{係数 (ひび割れ有り} \neq 0, \text{無し} = 0)$$

$$C_c: \text{解放面から } X_{cm} \text{ のひび割れ部分における表面塩分量 (\%)} \quad \cdots(2)$$

同じ乾湿繰り返し条件で環境温度を 40℃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考えられる．

4. ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋の腐食

自然電位法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，電流量分布の推定を行い，これより腐食反応量を推定した²⁾．電流量解析を用いて得られた，環境温度 20℃のひび割れ幅 0.09mm 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-5 に示す．供試体割裂後に測定した腐食面積と自然電位の経時変化から予測した腐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ている．本研究では，特にひび割れ周囲の塩化物イオンの拡散浸透に着目し，それがひび割れ周辺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のもとに，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．

$$E = -a \times \ln(\text{NaCl.wt}\%) - b \quad E: \text{電位(V)}, \text{NaCl: コンクリートに対する塩分(NaCl)の重量\%濃度} \quad \cdots(3)$$

図-6 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，Cl 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

本研究で得られた成果を以下に示す．

- 1) 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東大生研魚本研究室助手 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．

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) 小山理恵，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

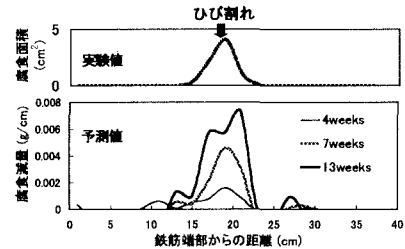


図-5 各点における腐食面積と腐食減量

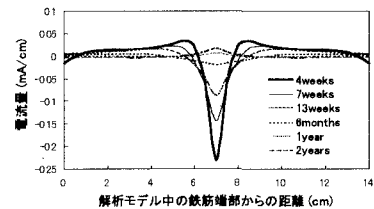


図-6 電流量の分布(解析結果)