

[1132] 鉄筋腐食膨張による表面コンクリートのひび割れモデル

松島 学^{*1}・堤 知明^{*2}・村上祐治^{*3}

1.はじめに

塩害による劣化現象は、コンクリート表面からの塩分浸透により鉄筋は腐食を開始し、その腐食膨張圧によりかぶりコンクリートにひび割れ、あるいは剥離・剥落へと進展する。須田らは、鉄筋の腐食膨張圧により鉄筋に沿ったひび割れ発生をモデル化するために、膨張圧を内圧とした厚肉円筒モデルを提案している[1]。筆者らも同様なモデルを提案している[2]。

しかしながら、実際のひび割れを観察すると、かぶりがある程度あると、鉄筋に沿ったひび割れを生じるが、鉄筋のかぶりが薄い場合は、鉄筋に沿ったひび割れが発生する前に、剥離が生じる現象が見られる。Browneによると、この違いは鉄筋のかぶり t_p と鉄筋径 ϕ の比 t_p/ϕ で表され、 $t_p/\phi > 1.5$ 以上の時はひび割れを、以下の時は剥離が発生することを示している[3]。筆者らは、既にひび割れと剥離の違いは、かぶりと鉄筋径の無次元量 D/ϕ ($D=2t_p+\phi$) で説明され、 D/ϕ が3.0以下の時は剥離を、3.0以上の時はひび割れが発生することを説明する力学モデルを提案した[4]。本研究は、その力学モデルを検証することを目的として、電食実験により腐食ひび割れを発生させ、 D/ϕ の差によるひび割れ発生パターンを調べたものである。

2. 電食実験

本実験は、コンクリート中の鉄筋を強制的に腐食促進させる、いわゆる、促進電食実験を行い、ひずみゲージによる電気的なモニタリング、並びに目視により腐食ひび割れ発生の観察を行った。その後、ひび割れ状況、腐食した鉄筋の評価等を行い、筆者らが提案しているひび割れパターンの理論の検証をおこなった。

2.1 供試体のパラメータ

供試体は、図-1に示すような30cm×30cm×45cmの供試体を製作した。鉄筋はみがき鉄筋とし、D25で長さ46cmを使用した。実験のパラメータである鉄筋のかぶりは、表-1に示すように19mm、25mm、44mm、50mm、75mmおよび100mmの6種類とし、2体ずつ同じものを作製した。試験体は全12体となる。

2.2 供試体の作成

供試体のコンクリートの配合を表-2に示す。供試体作成時には、コンクリート中の細孔液を電気的に導通させておくために練り混ぜ水に3%NaCl水溶液を使用した。次に、3%NaCl水溶液中に浸せきする鉄筋の端部は、エポキシ樹脂でコーティングを行い、電気的な絶縁を行った。一方の鉄筋は上部を5mm程度露出させ、電極とした。供試体は、28日間湿布養生を行った。その供試体

*1 東電設計(株)技術開発本部耐震技術部課長 工博 (正会員)

*2 東京電力(株)技術開発本部技術研究所構造研究室主任研究員 工修 (正会員)

*3 (株)間組技術研究所技術研究部 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	かぶり t_p (mm)	D/ϕ
A	19	1.5
B	25	2.0
C	44	3.0
D	50	4.0
E	75	6.0
F	100	8.0

ここで、 $D=2t_p+\phi$, t_p :かぶり, ϕ :鉄筋径

表-2 使用したコンクリート

セメントの種類	普通ポルトランドセメント
粗骨材の最大寸法 (mm)	10
水セメント比 (%)	50
細骨材比 (%)	46
単位量	
水 W(kg/m^3)	175
セメント C(kg/m^3)	350
細骨材 S(kg/m^3)	804
粗骨材 G(kg/m^3)	972
混和材 (%)	0.03

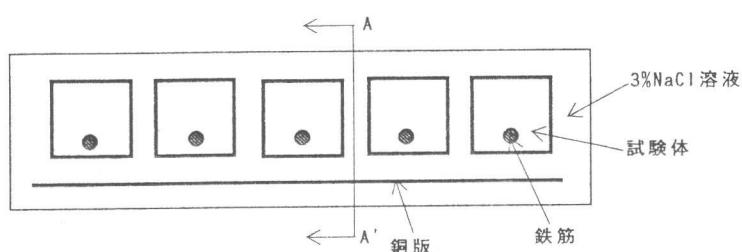


図-2.a 電食実験の方法

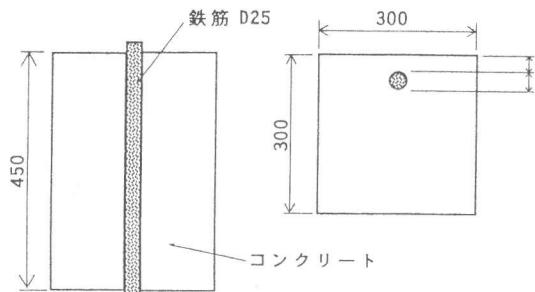


図-1 試験体

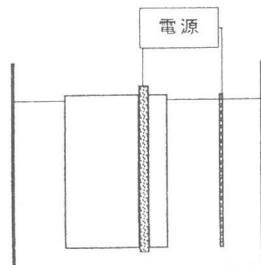


図-2.b 電食実験の方法

に、ひび割れの発生時間を調べるために電極側の鉄筋近傍のコンクリート表面にひずみゲージを一枚貼付けた。

コンクリートの打設は梁の施工を想定し、供試体を横方向にかぶり側からコンクリートを打設した。そのため、ブリージングにより鉄筋下に空隙が生じることが予測された。

電食実験は、図-2に示すように供試体を3%NaCl水溶液中に浸せきさせ、供試体中の鉄筋を直角に結束し、電流密度0.5mA/cm²程度の定電流を流し、鉄筋の腐食を促進させた。通電は供試体A、B、C、D、E、Fを1系列として行った。

3. 電食実験の結果

3.1 供試体の電気的挙動

通電420時間程度までは、0.2mA/cm²(1体当たり12mA)の定電流を流した。供試体A,Bにひび割れが生じ、これらの供試体を除外したために電流が0.125mA/cm²に低下した。その後、780時間(33日)程度この電流量で通電させたが、供試体C、D、E、Fにひび割れが生じなかったため、0.5mA/cm²(1体当たり180mA)に増加させた。その結果、通電200時間(8.3日)で供試体C、D、E、Fにひび割れが発生した。

電圧は、30分毎に計測しており、通電直後で電圧が低下した。この通電初期の低下は、供試体の周囲の3%NaClがコンクリート中に徐々に浸透し、かぶりコンクリートの抵抗が徐々に低下したものと考えられる。通電時間が、1200, 1300時間に急激な電圧の降下が見られた。この急激な電圧降下は、ひび割れの発生によりひび割れを通して塩水が浸透し、かぶりコンクリートの電気抵抗が低下したためと考えられる。

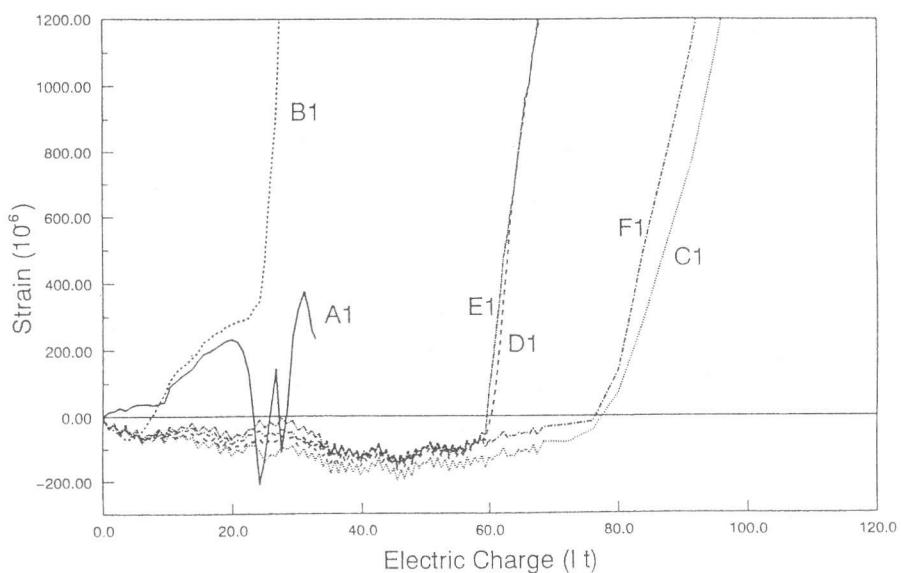


図-3.a 鉄筋近傍のひずみと電気量 (A1～F1)

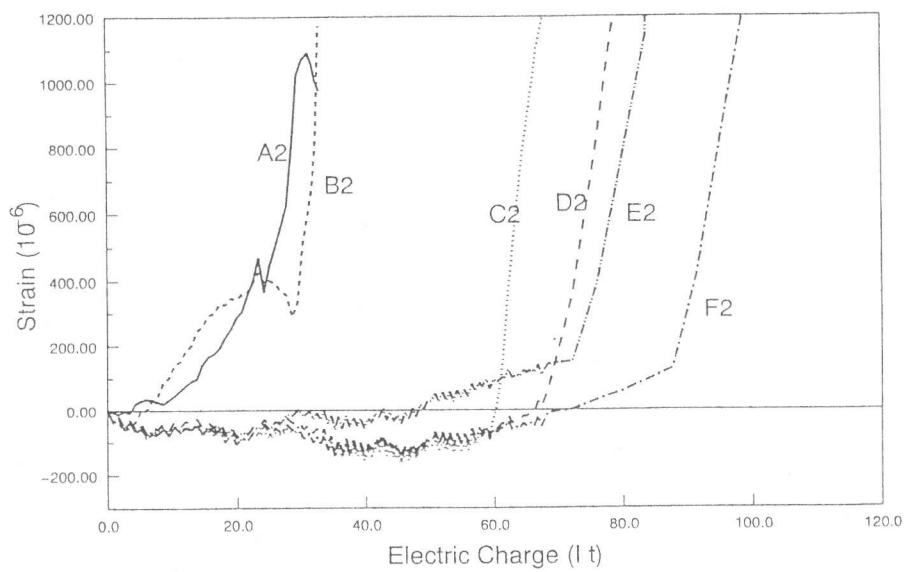


図-3.b 鉄筋近傍のひずみと電気量 (A2～F2)

3.2 ひずみの経時変化

電食実験時に、供試体上面の鉄筋近傍のコンクリート部分に貼付けたひずみゲージと電気量の関係を、供試体A1～F1までを図-3.aに、供試体A2～F2までを図-3.bに示す。ここで、電気量は電食実験時に通電した電流値に時間を乗じたものである。電流と時間を乗じた値は、鉄の腐食生成物の量と密接な関係があるために上記のように比較している。

コンクリートのひずみは、比較的かぶりの薄い供試体A,Bを除き、ひずみの増加がほとんど見られない期間があり、その後急増している。これは、供試体の打設をブリージングの影響を考慮して、コンクリートのかぶり方向から打設したため、鉄筋下部にブリージングが発生し、その空隙を鉄筋の腐食生成物で埋設するまでコンクリートに応力が加わらなかったためと考えられる。コンクリートのかぶり t_p 、あるいは D/ϕ が増加するにしたがって、ひび割れが発生する電食時間が長くなっている。その中でも、供試体A,Bのタイプと、供試体C,D,E,Fのタイプとで、ひび割れが発生する電食時間により大きく層別することができる。これは、筆者らが提案しているひび割れ発生のメカニズムの違いに起因するものと考えられる。本実験の場合、供試体A,Bは剥離を生じる形態となり、供試体C,D,E,Fの場合はひび割れの形態になったものと思われる〔4〕。

ひずみの挙動は、供試体A,Bでは、徐々に増加しており、特に、B1においては 342μ で急激にひずみが増加した。これに対して、供試体C,D,E,Fは急激にひずみが増加しており、ひび割れ発生が急激に生じている。

3.3 ひび割れ状況

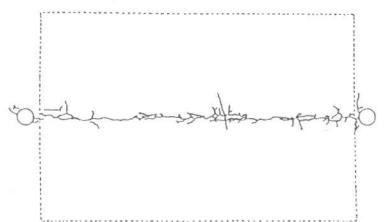
腐食した供試体のひび割れ状況を図-4に示す。ひび割れの進展は目視による観察から行ったので、ひび割れの発生が時間的に急激であるために、はっきりした進展方向は把握することは出来なかった。供試体A1,A2,B1,B2のひび割れの進展は、はじめにコンクリート表面に微細ひび割れが数多く発生し、その後進展し、数も増加し、幅も大きくなるのが観察された。供試体C,D,E,Fは、外観変化に全く変状の兆候が見られずに、突然ひび割れが表面まで貫通した。

供試体A1,A2,B1,B2に発生したひび割れは、ひび割れ幅が非常に狭く、ひび割れが鉄筋に沿って密集して発生した。また、かぶりコンクリート側にひび割れが発生しており、その反対方向には、ひび割れは発生していないかった。一方、供試体C,D,E,Fのひび割れは、ひび割れ幅が供試体A,Bに比べて大きく、 $0.1\sim0.5\text{mm}$ 前後であり、ひび割れが鉄筋に沿って1本発生した。また、かぶりコンクリート側にひび割れが発生しているが、その反対方向にも、ひび割れは発生している。このように、供試体A,B ($D/\phi < 3.0$) と供試体C,D,E,F ($D/\phi > 3.0$) では、ひび割れの形態に明らかな違いがある。

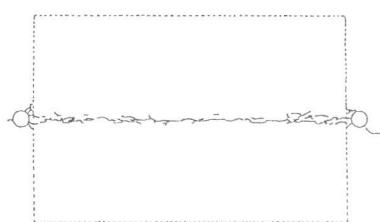
3.4 腐食度の評価

実験終了後、鉄筋の重量減少率および腐食度を調べた。鉄筋を碎りだした後に、鉄筋の腐食度の評価などを行った。その結果、供試体A,Bの腐食面積は、かぶりコンクリート側だけが腐食しており、供試体C,D,E,Fは全表面が腐食していた。

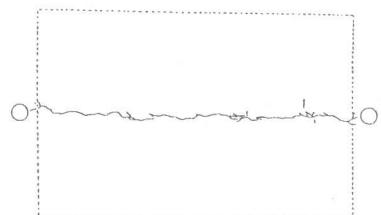
腐食によるひび割れ発生の現象は、腐食生成物の膨張圧により鉄筋周囲のコンクリートに荷重が徐々に加わり、コンクリートがクリープ変形する。その発生応力がコンクリートの引張強度よりも大きくなった時にひび割れが発生するものと考えられる。そのため、通常のコンクリートの破壊ひずみよりも、実験では大きなひずみ量でひび割れが発生したのではないかと思われる。土木学会の示方書からおおよそのひずみを計算すると、次のようになる。本実験でのコンクリート強度の条件は、圧縮強度 $376\text{kN}/\text{cm}^2$ 、弾性係数 $310500\text{kN}/\text{cm}^2$ 、引張強度 $28\text{kN}/\text{cm}^2$ である。この値から弾性ひずみとクリープひずみは、弾性ひずみ $\epsilon_e = 28/310500 = 90\mu$ 、クリープひずみ $\epsilon_c = \psi \cdot \sigma / E_e = 3.1 \times 28/310500 = 280\mu$ と求められる。従って、全ひずみ ϵ は、弾性ひずみとクリープひずみを合計したものであり、これがひび割れ発生ひずみと仮定して、 $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_c = 90 + 280 =$



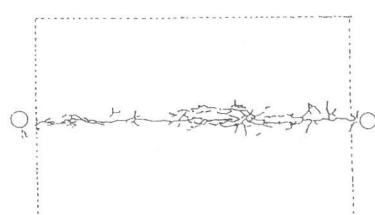
試験体A 1



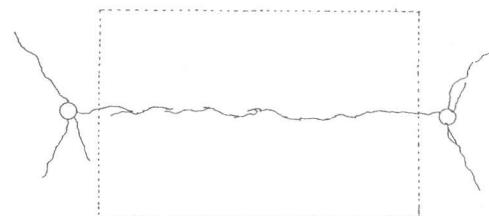
試験体A 2



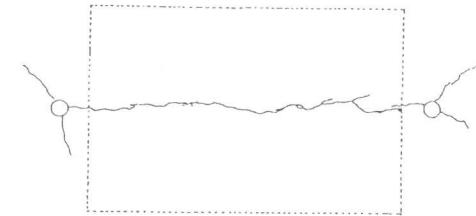
試験体B 1



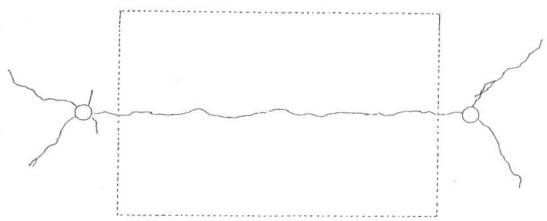
試験体B 2



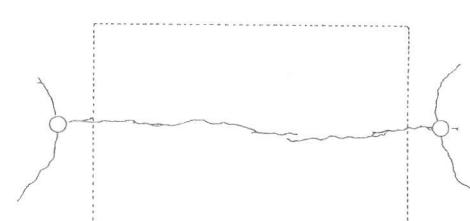
試験体C 1



試験体C 2



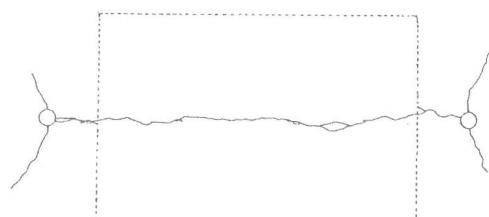
試験体D 1



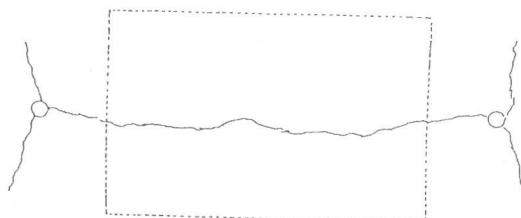
試験体D 2



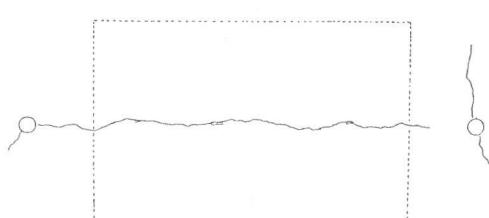
試験体E 1



試験体E 2



試験体F 1



試験体F 2

図-4 各試験体のひび割れ状況

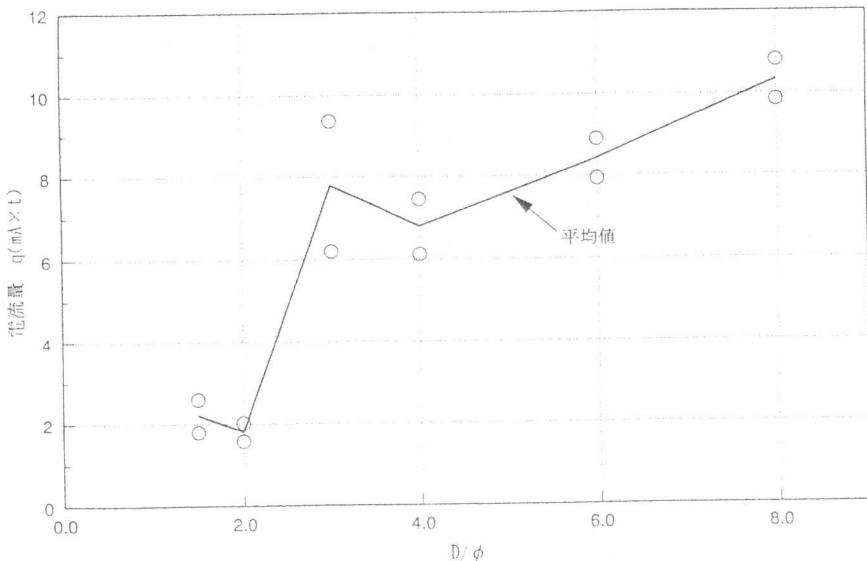


図-5 D/ϕ とひび割れ発生時の電気量

370 μ とした。また、図-3.a,bからもわかるように実験の経時観測からも、350 μ 程度でひずみが急増しており、ほぼひび割れが発生したと判断される。このことからひび割れ発生のひずみを350 μ と判断し、その時の電気量を調べた。図-5は D/ϕ とひび割れ発生時の電気量の関係である。図中の実線は、その平均値である。 D/ϕ が小さい供試体A,Bと大きな供試体C,D,E,Fは、ひび割れの発生に違いがある。

4.まとめ

筆者らは、今までにひび割れと剥離の違いは、かぶり t_p と鉄筋径 ϕ の無次元量 D/ϕ ($D=2t_p+\phi$)で説明され、 D/ϕ が3.0以下の時は剥離を、3.0以上の時はひび割れが発生することを説明する力学モデルを提案している [4]。本研究では、その力学モデルを検証するために、電食実験により発生させた腐食ひび割れパターンと比較し、その妥当性を調べたものである。その結果、 $D/\phi < 3$ を境にして、ひび割れパターン並びにひび割れ発生時の電気量が明らかに異なることが確かめられた。本実験では、 $D/\phi < 3.0$ で明確な剥離を生じなかったものの、得られた結果は筆者らのモデルの妥当性を示唆しているものと考えられる。

(参考文献)

- [1] 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋 賢:腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992.
- [2] 関 博, 松井邦人, 松島 学, 金子雄一, 田畑 裕, 「コンクリート構造の寿命予測に関する一考察」第12回コンクリート工学年次論文報告集, 1990, pp.569~574.
- [3] R.D.Browne: Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP-65, pp.169~204, 1980.8.
- [4] 松島 学, 堤 知明, 関 博, 松井邦人:鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード, コンクリート工学年次論文報告集, 第15卷第1号, 1993, pp.727~732.