# 論文 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量

松島 学\*1·横田 優\*2·関 博\*3

要旨: コンクリート構造物の維持管理業務で補修判断の一つの指標は腐食ひび割れ発生時期であり、構造物の耐荷力を評価するためのひとつの大きな指標である。コンクリート標準示方書によれば  $10 \text{mg/cm}^2$  と言われている。本研究は、鉄筋の腐食膨張によるひび割れ発生腐食減量を電食実験および乾湿繰返実験の結果、物理モデルを使った計算結果から求めた。その結果、物理モデルからのひび割れ発生腐食減量は、 $50 \sim 150 \text{mg/cm}^2$ 、電食実験では、 $50 \text{mg/cm}^2$  程度、乾湿繰返実験の結果は、 $20 \sim 80 \text{mg/cm}^2$ であり、コンクリート標準示方書の値より大きい値である。

キーワード: ひび割れ発生腐食減量,物理モデル,電食実験,乾湿繰返実験

#### 1. はじめに

コンクリート構造物は、一般に耐久性が優れているために、従来メンテナンスフリーと考えられ、維持管理のための配慮がなされない場合が多かった。近年日本各地でコンクリート構造物の劣化、特に早期劣化現象が指摘されはじめ、維持管理業務の重要性が再認識されている。維持管理業務で補修判断の一つの指標は腐食ひび割れ発生時期であり、構造物の耐荷力を評価するためのひとつの大きな指標である1)。

腐食ひび割れ発生時の腐食減量は、一般に電食実験の結果から求められ、コンクリート標準示方書によれば10mg/cm²と言われている。図-1は、ひび割れ発生腐食減量とかぶりの関係である。図に見られるように通常のかぶりであれば、10mg/cm²は妥当であることがわかる。電食実験は、①腐食がひび割れ面に集中し、局所的な腐食が生じること、②鉄筋全体がアノードとなることから2次元的形状の腐食形態になる、③電食実験と実際の環境では腐食生成物が若干異なることが言われている。さらに、実構造物は、鉄筋とコンクリートの間には、施工時のブリージングや乾燥収縮により隙間が空いていること

が自明である。鉄筋が腐食すると、その隙間を埋めてからコンクリート部に内圧を発生させる。しかし、電食実験による鉄筋の腐食の場合、局所的に腐食が進行することから広い範囲で鉄筋とコンクリート部の隙間を埋めることなく、局所的な腐食応力によりひび割れが発生することが考えられ、隙間の影響が出にくいことが挙げられる。従って、実構造物は空隙を埋めるまでの腐食減量分だけひび割れ発生までに多く必要である。

本研究は,鉄筋の腐食膨張によるひび割れ発 生腐食減量を電食実験および乾湿繰返実験の結

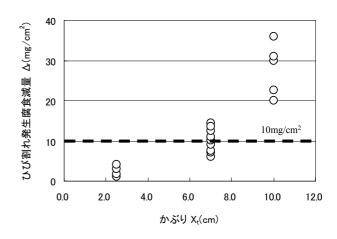


図-1 ひび割れ発生腐食減量 2)

<sup>\*1</sup> 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

<sup>\*2 (</sup>株) 四国総合研究所 土木技術部主席研究員 工博 (正会員)

<sup>\*3</sup> 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

果,物理モデルを使った計算結果から実構造物 のひび割れ発生腐食減量を求めた。

## 2. ひび割れ発生モデル

腐食減量および腐食膨張圧と経過時間の関係 を図-2 に示す。腐食が開始すると、はじめはコ ンクリートと鉄筋の隙間を腐食生成物が埋める。 それが終了すると、腐食膨張によりコンクリー トに膨張圧が発生する。この膨張圧によりかぶ り部のコンクリートに引張応力が発生し、コン クリートの引張強度以上になるとひび割れが発 生する。筆者らは鉄筋が腐食することによりコ ンクリートに腐食ひび割れが発生する物理モデ ルを厚肉円筒モデルにより力学的に解く方法を 提案してきた<sup>3)</sup>。腐食膨張によるひび割れ発生の 物理モデルの考え方を図-3 に示す。 (b)にある ように腐食した鉄筋が数倍に膨張することによ り(a)のまだ腐食していない鉄筋と(c)のコンクリ ート部が内圧をうける厚肉円筒シェルとして挙 動するとし、コンクリートの引張応力を求める。 この引張応力がコンクリートの引張強度を超え るとひび割れが発生するとしている。このモデ ルは、2次元的なモデルでる。実際の腐食のよ うに3次元的に腐食している状況を再現するた めに腐食生成物の3次元的な分布を考慮するた めの係数 1/1.5 を設け、鉄筋の腐食厚さを低減し た。

ひび割れ発生腐食減量とかぶりの関係を上記の計算手法で求めた。計算では鉄筋径は 22mmと一定、腐食生成物の膨張率を n=2.0~4.0、かぶりを 20~60mm に変化させ求めた。腐食生成物の膨張率は、図-4 に見られるように生成物の種類により 1.8~6.5 まで大きく変化することが知られている。この値を参考に一般的な値を考えて上記のような値を設定した。ブリージング等によるコンクリートと鉄筋の隙間は、Luiらの既往の研究 4)より厚さを 0.0135mm、全周にわたり一様に設定した。

計算結果からかぶりが大きくなると腐食減量は指数的に増大し、その傾向は腐食生成物の膨

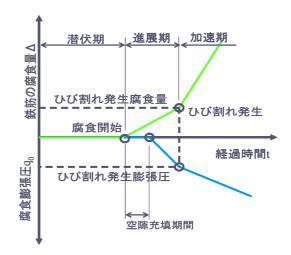
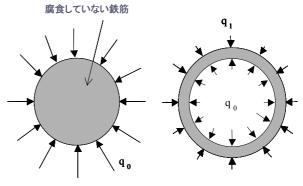
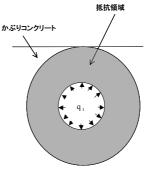


図-2 腐食減量および腐食膨張圧と経過時間



(a) 腐食していない鉄筋

(b) 腐食生成物



(c) かぶりコンクリート

図-3 腐食膨張によるひび割れ発生の物理モ デル

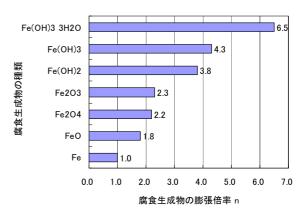


図-4 腐食生成物の膨張率の種類 4)

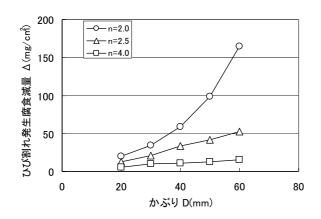


図-5 ひび割れ発生腐食減量とかぶり

張率が小さいほど顕著である。当然であるが、腐食生成物の膨張率が小さいほどひび割れまでの腐食減量が大きく、その傾向は小さいときに感度が大きい。計算結果からかぶり  $40\sim60$ mmでのひび割れ発生時の腐食減量は、 $20\sim150$ mg/cm²であることがわかる。

# 3. 電食実験によるひび割れ発生腐食減量 5)

図-1 での電食実験での試験体は鉄筋径 Φ =13mm であり、1/2 スケールの縮尺である。同じ ような電食実験でも、実物のスケールの場合を 考え、主筋として D22 を、せん断補強筋として D10 を採用して電食実験を実施した。実験での 電流量は、0.7mA/cm<sup>2</sup>とした。試験体の一例を図 -6 に示す。供試体の寸法は、300×300×130 と した。実験の因子は、①ひび割れ幅、②かぶり、 ③補強筋の有無の3つである。ひび割れ幅は, 0.2~0.8mm を目標値として実験を実施した。補 強筋のない試験体はかぶり 40mm とした。せん 断補強筋を有する試験体は、かぶり 40mm と 70mm の 2 つを考えた。試験体は、全 15 体であ る。鉄筋の長さは900mmとした。鉄筋は、表面 の黒皮を 10%クエン酸 2 アンモニウム溶液で除 去して使用した。主筋のみを積極的に腐食させ ることを目的としているため, 補強筋と主筋の 間には、絶縁物を介した。各試験体の鉄筋は、 腐食減量を計算するため、あらかじめ重量と長 さを測定し、単位長さの重量を求めた。 電食実 験の様子を図-7に示す。目標のコンクリート強 度を 35N/mm<sup>2</sup> とした。練り混ぜ水には、3%NaCl 溶液を用いた。腐食ひび割れ幅は、毎週 1 回、発生したひび割れを 10mm 間隔で測定した。

ひび割れ幅と腐食減量の関係を図-8に示す。 図中で、Nとあるのはせん断補強筋が無い場合、 Sとあるのはせん断補強筋が有る場合である。図 に見られるように, ひび割れ幅と腐食減量の関 係は線形関係にある。せん断補強筋の有無は, 腐食減量とひび割れ幅に影響を及ぼしていない。 一般に, せん断補強筋が有る場合は拘束効果に よりひび割れ幅が半分になるといわれている。 しかし, 形状が大きいと, せん断補強筋の拘束 効果は相対的に小さくなるので、ばらつきの中 に埋もれたと考えられる。図中に回帰直線も示 す。この直線とひび割れ幅ゼロの交点がひび割 れ発生腐食減量と考えると、 $50 \text{mg/cm}^2$ となり、 コンクリート標準示方書の値よりも大きい。実 験では、溶液中に試験体を設置していることか ら腐食生成物が溶出していることが考えられる。 実験でも試験体下部に腐食生成物が沈殿してい ることが観測されており、上記のことを裏付け られる。このことを考慮に入れると電食実験か らは、この値よりも小さな腐食生成物量でひび 割れが発生していると考えられる。

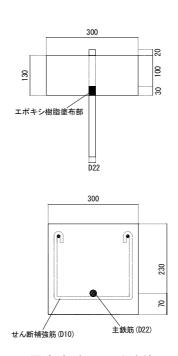


図-6 電食実験での試験体の一例

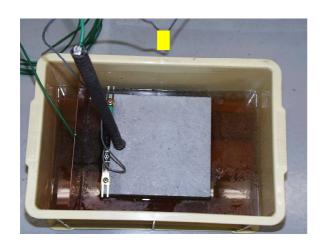


図-7 試験状況(電食実験装置)

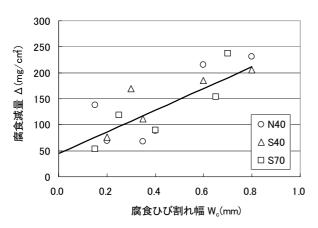


図-8 腐食減量と腐食ひび割れ幅

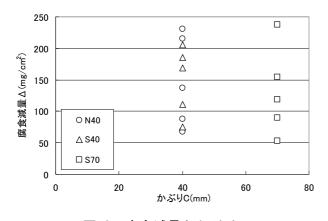


図-9 腐食減量とかぶり

腐食減量とかぶりの関係を図-9 に示す。図に見られるようにかぶりが、40mm と 50mm の 2 つのグループに区分される。各グループとも腐食ひび割れは同じ目標値を持った試験体が同数ずつあるので、その平均値を比較することでかぶりの影響を調べることができる。この図から、ある程度大きなかぶり、つまり剥離しないような

かぶりでは、あまり腐食減量にかぶりの因子は 影響しないことを意味している。

#### 4. 乾湿繰返実験によるひび割れ発生腐食減量

試験体の概略を図-10 に示す。実験の因子は、かぶりで、15~40mmの範囲で設定した。現在実験が終了している試験体は全9 体である。主筋およびせん断補強筋は全ての試験体で D16 および D10 を設置した。供試体の寸法は、200×200×130 とした。鉄筋の長さは 180mm とした。鉄筋は、電食実験と同様に表面の黒皮を 10%クエン酸 2 アンモニウム溶液で除去して使用し、鉄筋の設定条件は電食実験と同様に行った。主筋のみを積極的に腐食させることを目的としているため、補強筋と主筋の間には、絶縁物を介した。目標のコンクリート強度を 30N/mm² とした。練り混ぜ水には、3%NaCl 溶液を用いた。

鉄筋を腐食させ、目標となる試験体を作製する目的で乾湿繰返実験を行った。乾湿繰返実験は、70℃の温水に3.5 日間、その後乾燥し、温度15℃で3.5 日間試験体を乾燥させ、このサイクルを繰り返し行うことで乾湿繰返実験を実施した。実験装置と試験体の様子を図-11に示す。実験は現在60週間目に入っている。腐食ひび割れ幅は、毎週1回、発生したひび割れを10mm間隔で測定した。目標となる腐食ひび割れ発生時の瞬間を捉えることが難しいので、実験では腐食ひび割れ発生を0.1 から0.2mmに達した時と判断した。

ひび割れ発生腐食減量とかぶりの関係を図-12に示す。実験では、かぶりの大きい30~40mmの試験体は、まだ腐食ひび割れは発生しておらず、かぶり10~25mmの試験体のみの結果が得られている。この範囲では、かぶりの大きさに関係なくひび割れ発生腐食減量は、20~80mg/cm²の範囲にある。ひび割れ発生腐食減量と最大腐食ひび割れ幅の関係を図-13に示す。最大腐食ひび割れ幅は、ほとんど0.1mmの場合が多く、若干大きな場合もある。乾湿繰返実験結果のひび割れ発生腐食減量は、電食実験の結果

 $50 \text{mg/cm}^2$  の値とほぼ同程度の値となっている。 しかし、実用されるかぶり  $30 \sim 40 \text{mm}$  では、実

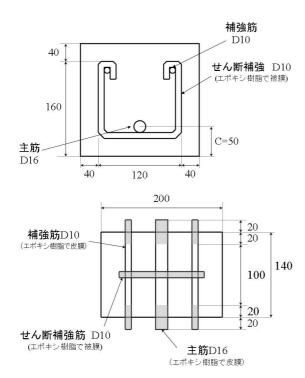


図-10 試験体概要(乾湿繰返実験)



図-11 試験装置の概要(乾湿繰返実験)

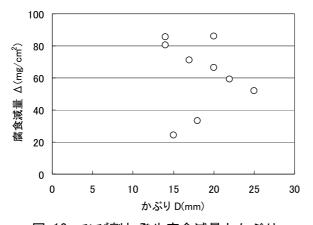


図-12 ひび割れ発生腐食減量とかぶり

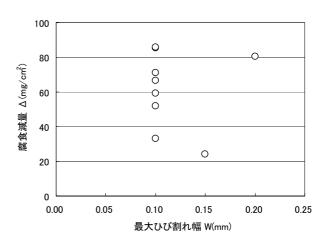


図-13 ひび割れ発生腐食減量と最大ひび割れ 幅

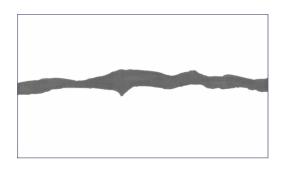
験で得られた腐食減量よりも大きくなることが 考えられる。

## 5. 実際の腐食減量

物理モデルから得られたひび割れ発生腐食減 量は, 20~150mg/cm<sup>2</sup>である。電食実験での結果 は,50mg/cm<sup>2</sup>程度,乾湿繰返実験の結果は,20  $\sim 80 \text{mg/cm}^2$  であり、この3つの結果は、腐食の メカニズムの複雑さを考慮するとほぼ一致して いると判断できる。しかし、電食実験では、溶 液中に浸水していることから腐食生成物が溶出 している。このことから腐食膨張に使われた腐 食生成物の量は、測定された腐食減量よりも少 ないことが推定できる。電食実験での鉄筋の腐 食状況と腐食した面積を図-14に示す。(a)の鉄筋 の腐食した状況は、腐食生成物を洗い流した後 の状況を見ているので、腐食生成物の状況は見 られない。(b)に見られるように、線状の腐食状 況になり、電食実験ではひび割れが発生する位 置に腐食が集中している。乾湿繰返実験での腐 食状況を図-15 に示す。(b)に見られるように腐 食面積は広がっている。この範囲は,鉄筋の下 部分に一致しており,ブリージング等により隙 間が存在している位置である。この2つの腐食 形態を見ればわかるように、電食実験の腐食形 態は局所的に腐食量が集中するために、少ない 量でも腐食ひび割れを発生させることができる。 このことから腐食生成物が溶出しても,ひび割れ発生腐食減量が乾湿繰返実験の場合よりも多くならなかった理由と考えられる。さらに,乾湿繰返実験の結果は,かぶりの小さい場合の腐食減量であり,数値解析結果の値より若干小さくなっているのがわかる。しかし,これらの結果は,コンクリート標準示方書で示されている10mg/cm²よりも大きな値を示している。



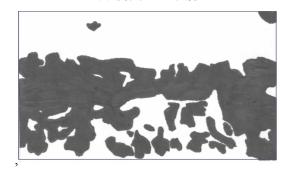
(a) 腐食した鉄筋



(b) 腐食分布 図-14 鉄筋の腐食分布(電食実験)



(a) 腐食した鉄筋



(b) 腐食分布 図-15 鉄筋の腐食状況(乾湿繰返実験)

#### 6. まとめ

本研究は,電食実験,乾湿繰返実験および物 理モデルよりひび割れ発生腐食減量を推定した。 以降に本研究の成果を示す。

- (1) 筆者らが提案している腐食ひび割れ発生の 物理モデルは、腐食のメカニズムの複雑さを 考えれば、ほぼ実挙動を推定できる。
- (2) 実電食実験では腐食ひび割れが発生する位置に腐食が集中している。乾湿繰返実験では、腐食部分は広がっており、実現象に近い腐食現象である。
- (3) 電食実験, 乾湿繰返実験および物理モデルより腐食ひび割れの腐食減量は  $50\sim100 \,\mathrm{mg/cm^2}$  である。この値は、コンクリート標準示方書で示されている  $10 \,\mathrm{mg/cm^2}$  より大きい。

#### 謝辞

本研究を実施するに当たり、実験や煩雑な計算を実施してくれた香川大学工学部大学院生牧野誠太郎氏に感謝をいたします。

## 参考文献

- 大即信明,鈴木慎也:耐久性の優れたコンク リート構造物-港湾-,土木学会論文集, No.327(V-5), pp.29~39, 1986年8月
- 2) 小林豊治,米澤敏男,出頭圭三:コンクリート 構造物の耐久性診断シリーズ3-鉄筋腐食の 診断-を修正して使用,森北出版,pp.197,1993
- 3) 松島 学,堤 知明,関 博,松井邦人:塩害環境 下における RC 構造物の設計かぶり,土木学 会論文集,No.490/V-23,pp.41~49,1994年5月.
- 4) Youping Liu, Richard E. Weyers: Modeling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures, ACI Material Journal, PP.675-681, Nov.-Dec. 1998 International, Vol.8, No.12, pp.28-31, Dec.1986
- 5) 牧野誠太郎,松島 学,横田 優:電食により発生したひび割れ幅が付着性能に及ぼす影響, 土木学会第57回年次学術講演会,pp.1119~1120,平成14年9月.