

論文 既設構造物のひび割れ幅から鉄筋腐食量の推定

堤知明^{*1}・松島学^{*2}・村上祐治^{*3}・関博^{*4}

要旨：近年コンクリート構造物の維持管理の重要性が認識され、それとともに現在使用している構造物が後何年供用できるかという寿命予測手法や、構造物の劣化を遅らせるための補修方法・材料の研究が盛んに行われている。本論文は、日常点検から構造物の耐荷力を推定する方法を開発することを目的に、耐荷力と密接な関係のある鉄筋腐食量をひび割れ幅から推定するモデルを構築し、既往の実験結果との対比によりモデルの妥当性を検討したものである。

キーワード：塩害劣化、鉄筋腐食、ひび割れ幅、かぶり、鉄筋径、物理モデル

1. はじめに

コンクリートの早期劣化の問題が注目され初めてから十数年になる。この間にコンクリート構造物も適切な維持管理を行うことが構造物の長寿命化にとって必要であり、既に蓄積された社会資本の保全の観点からも、維持管理がきわめて重要であるとの認識が高まってきている。

構造物の維持管理を行う上での使用限界は、ひび割れが発生するまでとしている場合が多い。この理由として、変状が容易に発見されやすく、構造物の耐荷力に問題がない場合がほとんどであるため安全側の対処であることや、公共構造物では、かぶりコンクリートの剥落による第三者傷害を防ぐことなどが考えられる。しかし、発電所構造物のように管理区域が設定され、一般住民が立ち入る可能性の少ない場合は、劣化が進んでも耐荷力的に構造物が維持できるならば補修の時期を遅らせるなど、使用限界に対し柔軟な考え方が適用できると思われる。これを可能にするためには現状の構造物の耐荷力を的確に評価する手法の開発が必要である。

本研究は、日常点検から構造物の耐荷力を推定する方法を開発することを目的に、耐荷力と密接な関係のある鉄筋腐食量をひび割れ幅から推定するモデルを構築し、既往の実験結果との対比によりモデルの妥当性を検討したものである。

2. ひび割れ幅と鉄筋腐食量のモデル

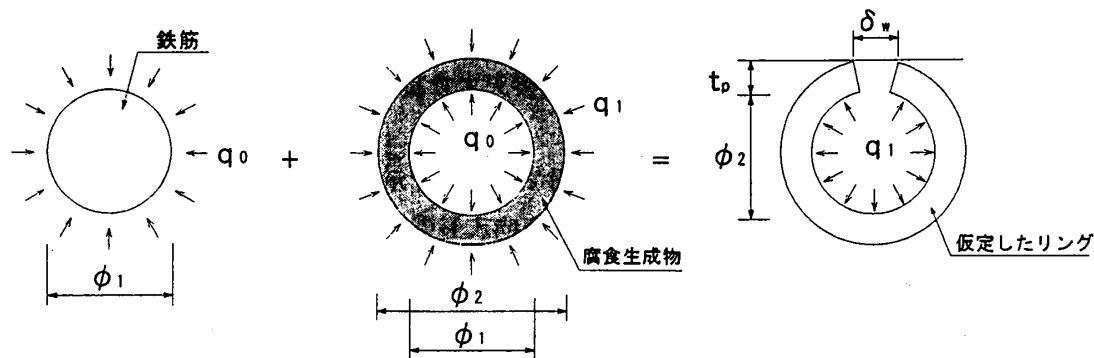
鉄筋が腐食した場合の鉄筋とコンクリートの応力関係のモデルを図-1のように定義する[1]。同図に示すようにまだ腐食していない鉄筋に圧力 q_0 と、腐食生成物（以下、錆と称する）によりひび割れが発生したかぶり部のコンクリートに圧力 q_1 が生じたとする。この圧力 q_1 により、コンクリート表面のひび割れ幅は、腐食が進展することにより大きくなると仮定した。ひび割れは、錆の膨張圧により幅が押し広げられると考え、かぶりコンクリートの挙動を一部切断された円筒モデルとして図-1(c)に示すようにモデル化した。図-2は、図-1(c)の状態、鉄筋腐食量からひび割れ幅を評価する考え方をフローにしたものである。同フローに示すように、本モデルでは、

*1東京電力(株)電力技術研究所構造研究室主任研究員、工修（正会員）

*2東電設計(株)技術開発本部耐震技術部課長、工博（正会員）

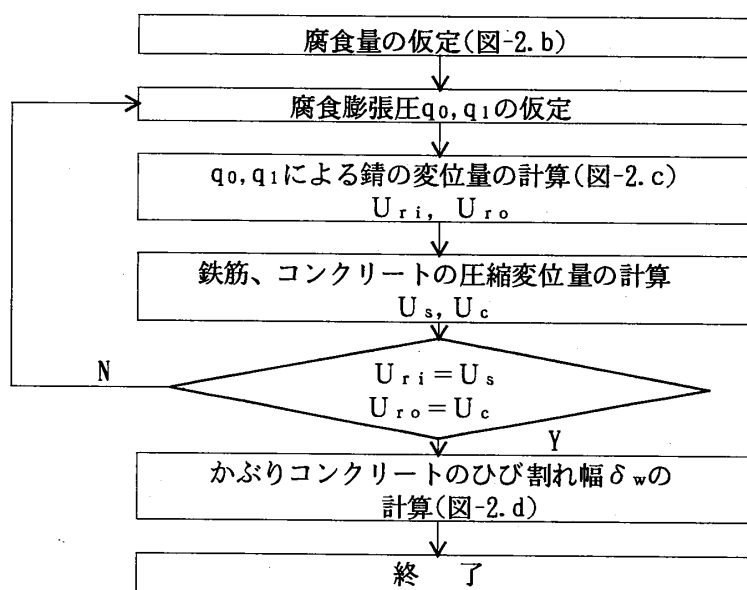
*3(株)間組技術研究所研究第二部主任研究員、工博（正会員）

*4早稲田大学教授 理工学部土木工学科、工博（正会員）

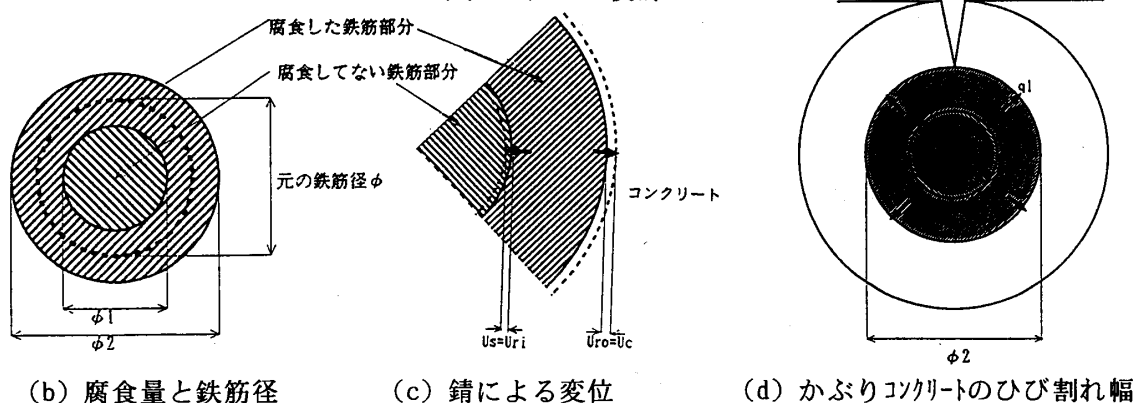


(a) 残存鉄筋の応力状態 (b) 腐食生成物が受ける応力状態 (c) かぶりの応力状態

図-1 ひび割れ幅と腐食量の関係の物理モデル



(a) モデルの検討フロー



(b) 腐食量と鉄筋径

(c) 錆による変位

(d) かぶりコンクリートのひび割れ幅

図-2 ひび割れ幅と鉄筋腐食量のモデル

始めにあるひび割れ幅を生じさせた時の鉄筋腐食量および錆の膨張圧を仮定する。腐食により元の鉄筋径 ϕ が減少し、錆が均一の厚さに鉄筋表面に生成されるものと仮定すると、腐食により減少した鉄筋径 ϕ_1 と錆により膨張した鉄筋の外周径 ϕ_2 は、式(1. a, 1. b)によって求められる(図-2. b)。しかしながら、実際の腐食は鉄筋表面に均一の厚さに生成されることはないで、その不均

一性を表す係数 α を導入した。

$$\phi_1^2 = \phi^2 - 4 \cdot \frac{A_w}{\pi} \quad (1. a)$$

$$\phi_2^2 = \phi^2 + 4(n-1)\alpha \cdot \frac{A_w}{\pi} \quad (1. b)$$

ここで、 n : 錆の体積膨張率、 A_w : 腐食による断面減少量 ($A_w = A_0 - A_f$, A_0 : 鉄筋公称断面積, A_f : 腐食後の残存鉄筋断面積)、 α : 腐食の不均一性を表す係数、である。

仮定した、腐食膨張圧 q_0 および q_1 により、錆部分の変位量を式(2. a, 2. b)により求める(図-2. c)。

$$U_{r,i} = \frac{(1+\nu_r)\phi}{2E_r(K^2-1)} \{ (1-2\nu_r)(q_0-q_1 \cdot K^2) + (q_0-q_1)K^2 \} \quad (2. a)$$

$$U_{r,o} = \frac{(1+\nu_r)\phi_2}{2E_r(K^2-1)} \{ (1-2\nu_r)(q_0-q_1 \cdot K^2) + (q_0-q_1) \} \quad (2. b)$$

ここで、 $U_{r,i}$: 腐食により鉄筋側に変位する錆の変位量、 $U_{r,o}$: 腐食によりコンクリート側に変位する錆の変位量、 $K = \phi_1/\phi_2$ 、 ν_r : 錆のポアソン比、 E_r : クリープを考慮したヤング係数 ($= E_r' \cdot 1/(1+\psi_r)$, E_r' : 錆のヤング係数)、 ψ_r : 錆のクリープ係数である。既往の実験研究[2]から、 $E_r' = 2.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\psi_r = 2.5$ 、 $\nu_r = 0.3$ とした。

一方、鉄筋およびコンクリートが受ける圧縮変位量は式(3. a, 3. b)により求められる。

$$U_s = - \frac{(1+\nu_s)\phi_1}{2E_s} q_0 \quad (3. a)$$

$$U_c = \frac{3}{32} \frac{q_1 \cdot (\phi_2 + t_p)^3}{E_c \cdot I_c} \phi \quad (3. b)$$

ここで、 U_s : 錆により圧縮を受ける鉄筋の変位量、 U_c : 錆により圧縮を受けるコンクリートの変位量、 E_s : クリープを考慮した鉄筋のヤング係数 ($= E_s' \cdot 1/(1+\psi_s)$, E_s' : 鉄筋のヤング係数 $= 2.1 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$)、 ψ_s : 鉄筋のクリープ係数 ($= 2.5$)、 ν_s : 鉄筋のポアソン比 ($= 0.2$)、 I_c : かぶり厚さ t_p 、単位奥行き厚さの鉄筋周辺のコンクリートの断面2次モーメント、 t_p : 鉄筋かぶり厚さ、である。

次に、 $U_{r,i} = U_s$ および $U_{r,o} = U_c$ となるように q_0 、 q_1 を計算し、求められた q_1 を用いて、図-2. d に示すように、内圧 q_1 を受ける内径 ϕ_2 の一部切断された薄肉円筒モデルによってかぶりコンクリートのひび割れ幅 δ_w を式(4)により求める。

$$\delta_w = \frac{3}{16} \frac{q_1 \cdot (\phi_2 + t_p)^3 (\phi_2 + 2t_p)}{E_c \cdot I_c} \quad (4)$$

3. モデルの感度解析

作成したモデルに対し、かぶり、鉄筋径およびひび割れ幅を検討因子として、これら各因子の変化が断面減少率 ($A_c = A_w/A_0$, A_w : 断面減少量, A_0 : 鉄筋公称断面積) に及ぼす影響を調べた。いずれの場合も腐食の不均一性を表す係数は $\alpha = 1.0$ で計算している。かぶりと断面減少率の関係を図-3. a に示す。図に示すようにかぶりが増加すると断面減少率は減少する傾向が認められる。減少の程度は、ひび割れ幅の増大に伴って大きくなる。鉄筋径と断面減少率の関係を図-3. b に示す。図

に示すように鉄筋径が大きくなると断面減少率は緩やかに減少する傾向にあるが、かぶりに対する感度よりも小さい。ひび割れ幅と断面減少率の関係を図-3. cに示す。断面減少率は、ひび割れ幅の増大とともにほぼ直線的に増加する傾向が認められる。増加率は、かぶりが小さいほど大きい。

4. 既往の研究の比較

本モデルの解析結果と既往の研究の実験結果との比較を行った。対象とした既往の研究は、丸山[3]等の研究および武若[4]等の研究結果である。丸山等の研究は、ひび割れ幅と腐食量の関係を検討したもので、角柱供試体に鉄筋（丸鋼使用）を埋め込んだものである。武若等の研究は付着強度および耐荷力に及ぼすひび割れ幅の影響を検討したもので、それぞれ円柱供試体および梁供試体を用いている。なお、丸山、武若等の研究は鉄筋腐食量で整理しているため、本研究で用いた断面減少率腐食量に変換して計算した。

(1) ひび割れ幅と腐食量

丸山等の実験結果と本モデルの解析結果の比較検討を図-4. a～cに示す。本モデルでは、 $\alpha=1.0$ として計算した。両者ともひび割れ幅の増加とともに腐食量が増加する傾向は一致しているものの、本モデルによる解析結果の方が丸山等の実験結果よりも小さい。図-5. a～cに武若等の円柱供試体（丸鋼使用）による実験結果との比較を示す。

かぶりが2.0cm程度では、本モデルの解析結果は実験結果と似た傾向を示しているが、かぶりが大きくなると本モデルと実験結果との差は大きくなる。

図-6は武若等の梁供試体（異形鉄筋使用）による実験結果との比較である。異形鉄筋を用いた場合でも、本モデルと実験結果の傾向は一致しているものの、本モデル方が腐食量を小さく評価している。

(2) かぶりと腐食量

図-7. a, bに丸山および武若等の実験結果から、かぶりによる腐食量の変化と本モデルの解析結果の比較を示す。図に示すように実験結果ではかぶりの変動に対して、腐食量は10～20mg/cm²

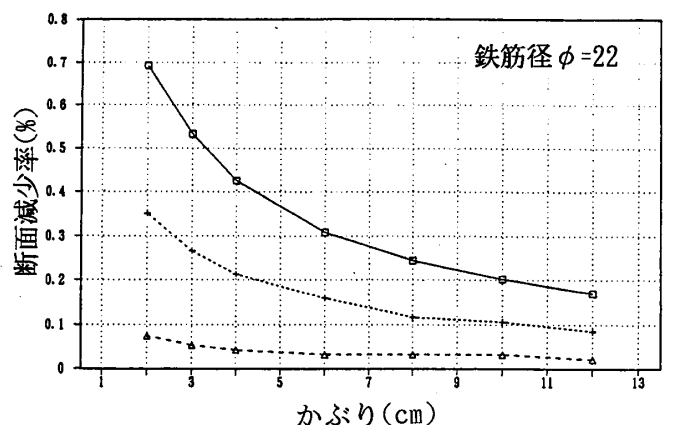


図-3. a かぶりと断面腐食率の関係

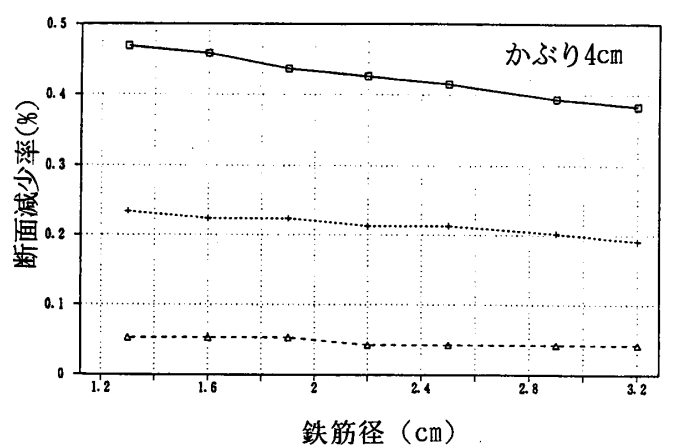


図-3. b 鉄筋径と断面腐食率の関係

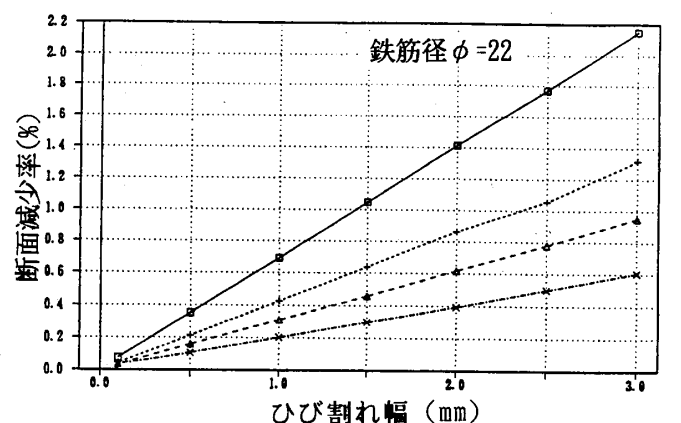
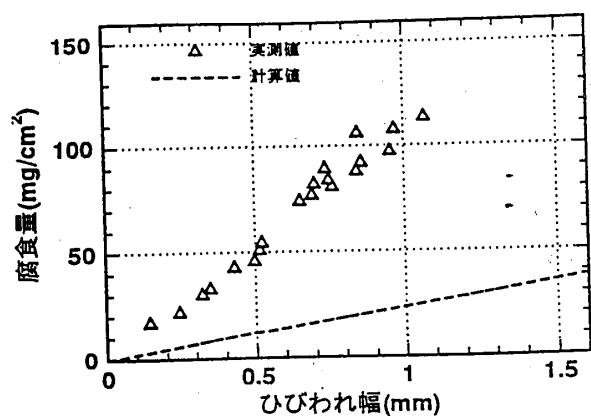
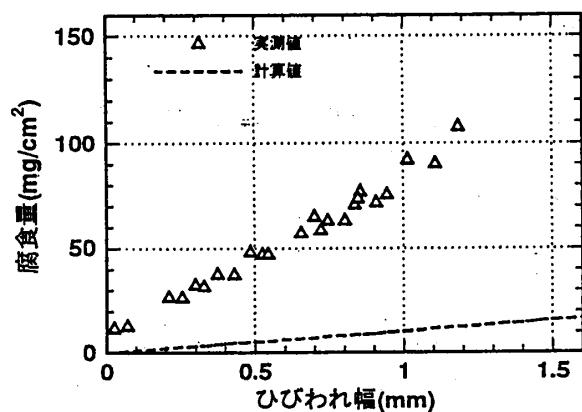


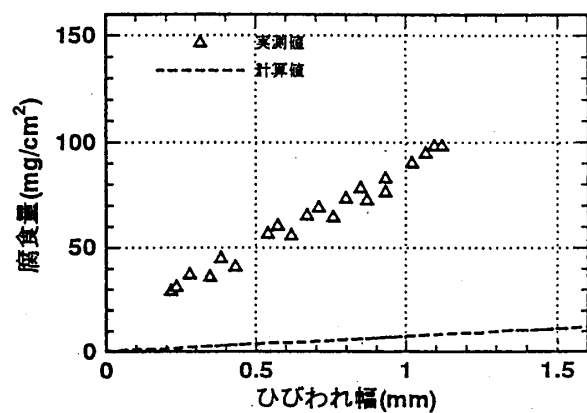
図-3. c ひび割れ幅と断面腐食率の関係



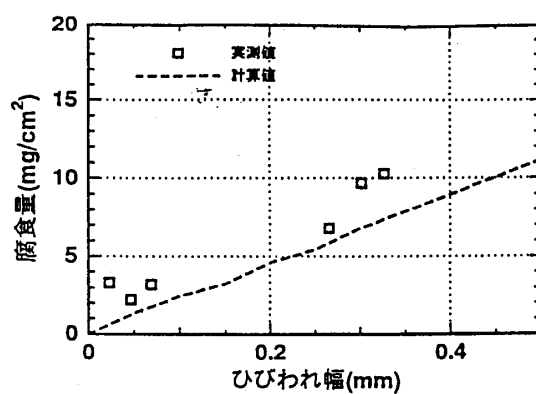
(a) かぶり2.5cm $\phi=19\text{mm}$



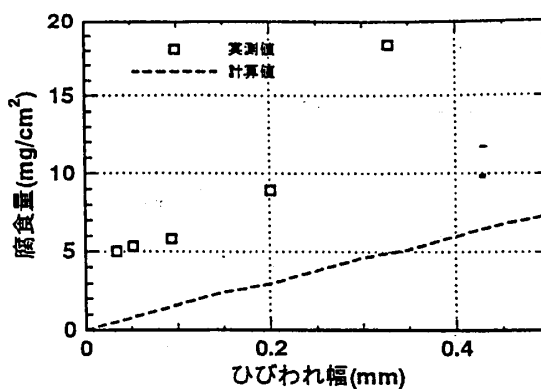
(b) かぶり7.0cm $\phi=19\text{mm}$



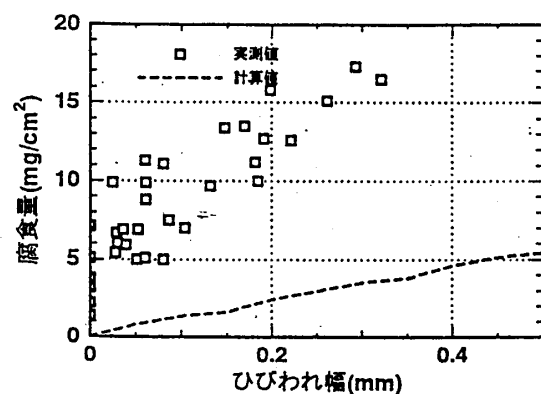
(c) かぶり10.0cm $\phi=19\text{mm}$



(a) かぶり1.85cm $\phi=13\text{mm}$



(b) かぶり3.1cm $\phi=13\text{mm}$



(c) かぶり4.35cm $\phi=13\text{mm}$

図-4 ひび割れ幅と腐食量の関係 (丸山のデータ) 図-5 ひび割れ幅と腐食量の関係 (武若のデータ)

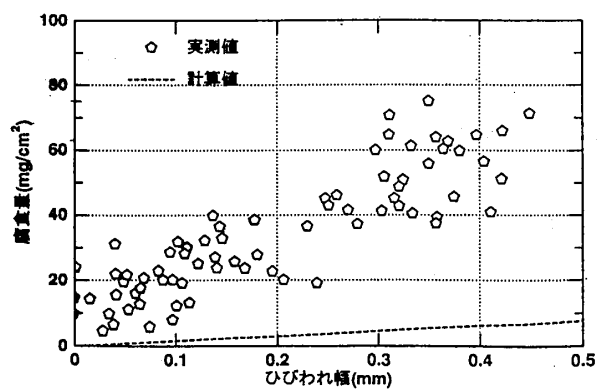
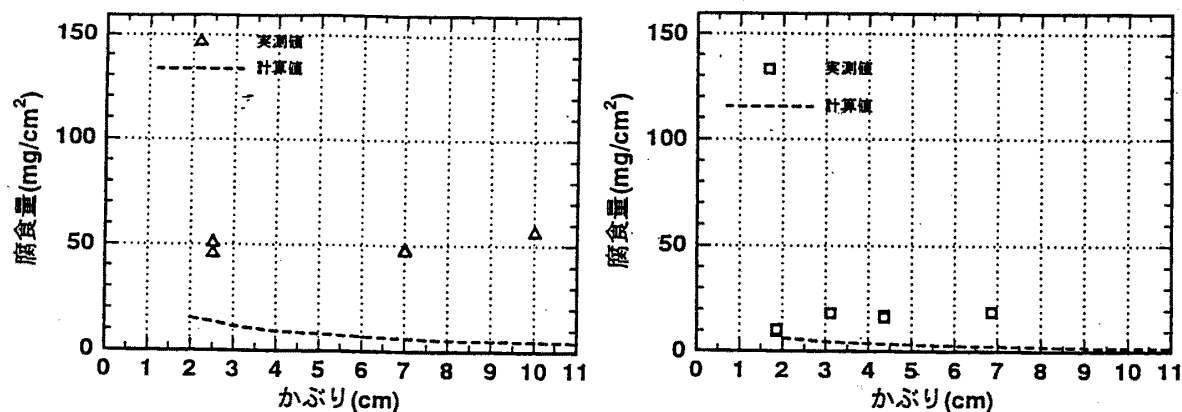


図-6 ひび割れ幅と腐食量の関係 (武若データ, かぶり3.0cm, $D=13\text{mm}$)



(a) $\phi = 19\text{mm}$, ひび割れ幅=0.5mm (丸山データ) (b) $\phi = 13\text{mm}$, ひび割れ幅0.3mm (武若データ)

図-7 かぶりと腐食量の関係

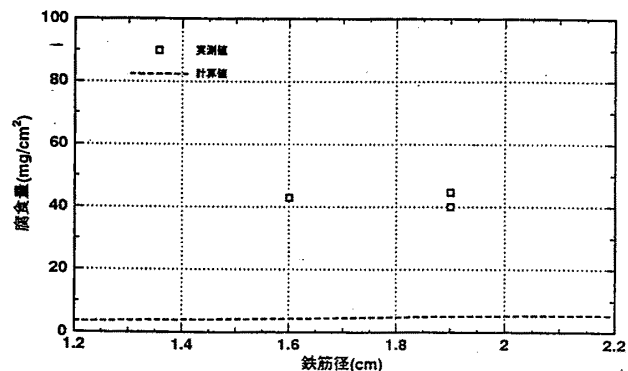
程度変動する。これは、ひび割れ幅の変動に対する腐食量の変動より小さい。これによりかぶりに対する腐食量の変動は小さいものと考えられる。本モデルでの解析結果は、かぶりが増加すると緩やかに減少する傾向が認められるが、変動の範囲は、実験結果と同様10~20mg/cm²程度である。ただし、この場合も本モデルでの解析結果は実験結果よりも値が小さい。

(3) 鉄筋径と腐食量

図-8に鉄筋径と腐食量の関係を示す。図に示すように実験結果及び解析結果とも鉄筋径の変動に対して腐食量の変動はほとんど認められない。この場合も解析結果の方が小さい値を示す。

5. まとめ

ひび割れ幅から鉄筋腐食量を推定するモデルを構築し、既往の実験的研究と比較した。その結果、ひび割れ幅、かぶり厚さおよび鉄筋径と腐食量の関係は、実験結果と傾向が一致した。しかし、本モデルで推定した腐食量は実験結果に比べ一様に小さな値を示した。これは本モデルでの解析が均一腐食と仮定しているため、実際の腐食よりも小さく評価しているものと考えられる。従って、本モデルを用いて実構造物の腐食量を推定するためには、 α を実構造物調査などにより適切に設定し補正する必要がある。



(かぶり=4.0cm, ひび割れ幅=0.3mm, 武若データ)

図-8 鉄筋径と腐食量の関係

参考文献

- [1] 須田久美子, Sudhir MISURA, 本橋賢一: 腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No1、1992. 6
- [2] 吉岡保彦, 米沢敏夫: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な研究、土木学会第37回年次学術講演会第5部、pp271~272、1984. 10
- [3] 丸山久一, 田森清美, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10、No2、1988、pp505~510
- [4] 武若耕治, 松本進: コンクリート中の鉄筋が、RC部材の力学的性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 6、1984、pp177~180