

論文 中性化による鋼材の腐食とコンクリートのひび割れ解析モデル

下西 勝*1・川口 和広*2・植木博*3

要旨：コンクリートの炭酸化反応モデルに、新たに鉄筋腐食モデル、コンクリートひび割れ解析モデルを追加し、コンクリート構造物の剥離・剥落時期を定量的に予測するモデルを構築した。炭酸化反応モデルにより pH の低下時期を求め、次に鉄筋腐食モデルにより鉄筋の腐食速度と量を定量的に求めた。ひび割れ解析モデルでは、腐食による鉄筋の膨張量からひび割れ時期とひび割れ幅を定量的に求めた。RC 壁高欄をモデル化して解析した結果では、約 30 年で中性化が 2.0cm の深さまで進行し、その後、鉄筋腐食により発生したひび割れは、約 6 日間で被りコンクリート表面まで到達した。解析精度を既往の論文等と比較した結果、妥当な精度であることが確認できた。

キーワード：中性化、鉄筋腐食、ひび割れ幅、炭酸化反応モデル、拡散係数、pH

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を論じる場合、コンクリート中に配置された鋼材の腐食について検討することが最も重要である。鋼材はコンクリート中の強アルカリ環境下では、その表面に不動態皮膜と呼ばれる酸化皮膜を形成し、この皮膜が鋼材と侵入した水分、酸素との反応を遮断して腐食反応の進行を防いでいる。

しかし、鋼材周辺のコンクリートが中性化し、空隙水の pH が低下すると、不動態皮膜が破壊され、さらに酸素と水分が供給されると鋼材の腐食が始まる^{1)・2)}。コンクリートの中性化に伴う鋼材腐食開始時期の予測は、既存の研究では被りコンクリートの厚さとフェノールフタレイン法によって計測された中性化深さととの差を中性化残りとして定義し、定性的に検討されてきた。しかし、都市内高架道路においては被りコンクリートの剥離・剥落により第三者被害が想定されるために、被りコンクリートのひび割れ性状とその発生時期の予測を定量的に行うことが、維持管理技術者にとって大きな課題となってきた。

このため、著者らは二酸化炭素の拡散と空隙水

中の化学平衡に基づき pH を評価指標とした炭酸化反応モデルを提案してきた^{3)・6)}。コンクリートの中性化は大気中の二酸化炭素(気体)によるほか二酸化硫黄、窒素酸化物などによっても生ずるが、これらの成分は二酸化炭素に比して濃度が著しく希薄であることから、その影響は少ないと言われており、著者らのモデルではコンクリートを中性化する主要成分を二酸化炭素としている。

今回、著者らの既報のモデルを用いて pH を解析的に求め、この pH を用いて腐食開始時期を規定することにより腐食速度をより明確にすることが出来る新しいモデルを構築した。本モデルを用いると、中性化に伴う鋼材の腐食による被りコンクリートのひび割れ幅とその位置および発生時期の予測が可能となる。硬化コンクリートの pH を適切に測定する手法は存在しないため検証は難しいが、既往の研究成果である腐食量とひび割れ幅等の関係等を用いてどの程度の精度があるかを検証したので報告する。

2. コンクリートの炭酸化反応モデル

コンクリートの炭酸化反応モデルは、著者らの

*1 首都高速道路公団 東東京管理局保全部設計課 (正会員)

*2 日本電子計算(株) 建設技術システム部解析第2グループ

*3 首都高速道路公団 東東京管理局保全部調査役 (正会員)

既報^{3)~6)}のモデルを用いた。このモデルは、二酸化炭素が外部からコンクリート内部へ拡散する物理モデルと、拡散した二酸化炭素が水酸化カルシウムなどのアルカリ成分と反応する化学モデルから成り立っている。

コンクリートの組織構造は、骨材やセメント粒子、水、空隙等で構成される空間を、水和反応によって生成される水和物が徐々に埋めることによって形成される。空隙は空隙水で満たされた液相と水の存在しない気相の二つに分けることができる。本解析モデルでは、コンクリート内の連続した気相部分を二酸化炭素がFickの第2法則に従って拡散し、その後、瞬時に空隙水中に溶解し、平衡が成立するものとした。

コンクリート中の気相-液相-固相における平衡状態のモデルについては、気相を拡散してきた二酸化炭素は、液相に溶け込むと瞬時に平衡状態に到達すると仮定した。また、固相から溶解してくる水酸化カルシウムと炭酸との平衡も瞬時に成り立つと仮定した。したがって、炭酸化反応は、二酸化炭素の拡散速度に律速されるモデルとなっている。

3. 鉄筋の腐食モデル

鉄筋の腐食モデルを新しく構築した。腐食速度はpHに依存するとし、腐食による鉄筋の膨張量は、須田ら⁷⁾の分析結果等から膨張率をモデル化することにより求めた。

3.1 鉄筋腐食速度のモデル化

今回の腐食速度のモデル化においては、腐食に必要な物質のうち、水分については、コンクリートの空隙水の形で鉄筋近傍に常に存在していると仮定した。酸素(気体)については、気相中における浸透拡散について今回解析した結果(図-1)から、腐食反応に必要な量の酸素(気体)が常に十分に存在するとした。

なお、この解析においては、二酸化炭素については前述の既報のモデルを用いた。酸素の拡散係数については、気体の熱力学より、見かけの拡散係数が分子量の平方根の逆数に比例するとの考え

に基づく(1)式を用いた。

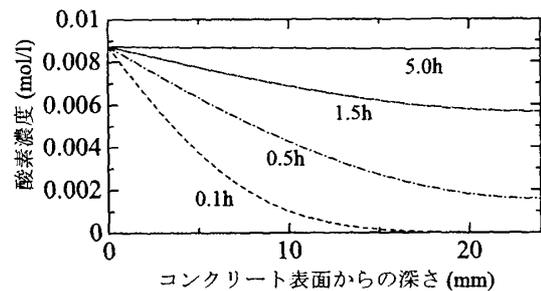


図-1 酸素拡散の解析結果図

$$\frac{(D_{CO_2})^2}{(D_{O_2})^2} = \frac{M_{O_2}}{M_{CO_2}} \quad (1)$$

ここで、

D_{CO_2} : 二酸化炭素の拡散係数 (m^2/s)

D_{O_2} : 酸素の拡散係数 (m^2/s)

M_{CO_2} : 二酸化炭素の分子量

M_{O_2} : 酸素の分子量

腐食の速度については、一般に、NaCl水溶液中の鉄筋腐食速度はpHによって規定され、pH10以下については鉄筋近傍における酸素イオンの供給に支配されるため、pHによらず一定となるとされている⁸⁾。しかし、コンクリート中の鉄筋の腐食速度についての値は一般に定まっていない。これは、コンクリート中の鉄筋の場合は、腐食の進行がコンクリート品質などに影響されて種々に変化し、一様に決定しがたいためであろうと考えられる。今回の解析における腐食速度については実験結果に基づく既往の研究⁹⁾を参考に、文献⁸⁾にある水溶液中の腐食進行速度の1/5と仮定した。開始時期については水溶液中においてと同様に、不動態の破壊されるpH13.2以下で腐食が始まり、酸素イオンの供給に制限されるpH10以下では一定とした(図-2)。

中性化の進行と鉄筋周囲のpHの関連については、pHの変化に伴い腐食が進行していくと思われるが、今回は解析の簡素化のため、中性化領域が鉄筋表面に到達した時点で鉄筋の全周囲のpHがそれと同一になり、腐食が均一に開始されると

仮定した。

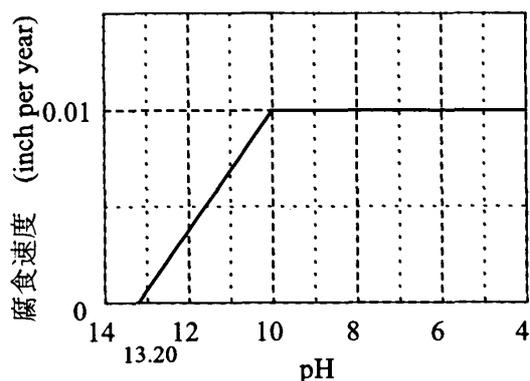


図-2 腐食速度モデル化図

3.2 鉄筋の体積膨張率のモデル化

須田ら⁷⁾の分析によると、腐食生成物は数種類の化学物質の混合物となっている。したがって腐食生成物の質量及び密度はそれを構成する化学物質の比によって異なることになるが、既往の研究結果^{7), 9)~11)}を見ると、腐食生成物の体積膨張率 n は、2.5～3 前後の値が用いられている。本モデルでは、図-3 に示す鉄筋径の定義と式(2)に示す体積膨張率 n を3としてモデル化した。鉄筋の体積膨張に伴い、周囲のコンクリートに一樣に膨張による変形が生じる。この変形によりコンクリートに引張ひび割れが発生するモデルである。

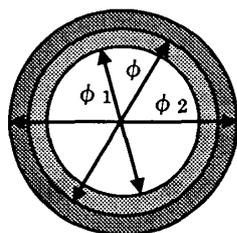


図-3 鉄筋径

$$n = \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{\phi^2 - \phi_1^2} \quad (2)$$

- ϕ : 腐食前の鉄筋径(mm)
- ϕ_1 : 腐食後の鉄筋径(mm)
- ϕ_2 : 腐食による鉄筋膨張径(mm)

4. コンクリートのひび割れ解析モデル

鉄筋の腐食膨張の圧力に起因するコンクリート

のひび割れに対し、TNO（オランダ応用科学研究機関）が開発した汎用 FEM 解析プログラムを用いて非線形 FEM 解析を行った。

本解析のモデルを図-4 に示す。首都高速道路の鉄筋コンクリート壁高欄を、使用鉄筋径 D13、被り厚 20mm として隅角形状にモデル化した。平面ひずみ要素を用いた 2 次元ひび割れの解析とし、鉄筋膨張による外径の変化としてコンクリート要素に直接、鉄筋の半径方向に強制変位を与えた。また、境界条件として、図-4 の上端の鉛直方向と右端の水平方向をそれぞれ拘束した。

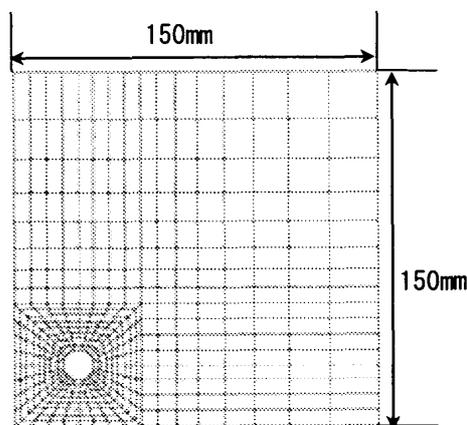


図-4 解析モデル

本解析に用いた材料特性を表-1 に示す。これらの値は、首都高速道路において壁高欄に用いられてきた鉄筋コンクリートを採取し、分析した結果に基づいている。

表-1 材料特性値

ヤング係数 (N/mm ²)	2.8×10 ⁴
ポアソン比	0.2
引張強度 (N/mm ²)	2.22

コンクリートのひび割れ解析手法として、多方向固定ひび割れモデル(Smeared Cracking Model)を用いた。これはひび割れ現象を要素の応力-ひずみ関係で表すモデルである(図-5)。ひび割れの発生位置が予め分っている場合には、離散ひび割れモデルとしてインターフェース要素でひび割れ面をモデル化する方法が有効であると考えられる

が、今回のように、ひび割れがどの位置に発生するか予測できない場合は、分散ひび割れモデルによりモデル化する方法が適切と考えられる。

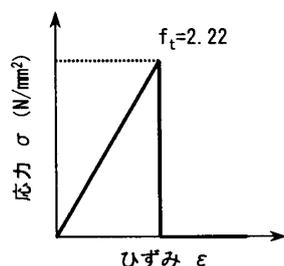


図-5 応力-ひずみ曲線

5. 解析結果と考察

5.1 コンクリートの炭酸化解析

炭酸化解析モデルによるコンクリートの中性化予測結果は、著者らの既報の1次元解析結果及びを用いる。図-6に示すように解析結果の中性化深さは、土木学会式、岸谷式による中性化深さより大きな値となっており、解析結果より得られる中性化深さは、30年で約2cmとなっていた。図中の最大、最小、平均値は壁高欄から採取した試料分析結果である。表-2にこの中性化解析を行った際に用いた解析条件を示した。これらは、首都高速において用いられたコンクリート壁高欄のデータに基づいて設定した。この解析結果に基づき、鉄筋の腐食膨張の開始は、供用期間30年後と設定した。

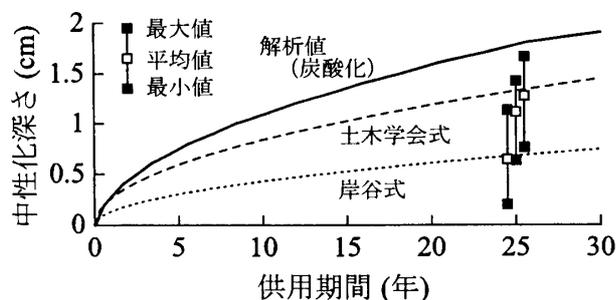


図-6 中性化深さの経時的変化

5.2 鉄筋腐食速度の解析

腐食速度 r_c は、図-2のpHと腐食速度の関係から読み取ることができ、炭酸化したコンクリート

表-2 壁高欄の中性化解析条件

単位水量 (kg/m ³)	167
単位セメント量 (kg/m ³)	287
水セメント比 (%)	58
乾燥開始材齢 (日)	7.0
湿度 (%)	70

の分析によって得られた値である $\text{pH}=10.9$ の時には $r_c=0.0072$ (inch/year) となる。これを前述の係数(1/5)で補正し、ついで単位を換算すると $r_c=0.0001$ (mm/day) となる。D13鉄筋に対して腐食生成物による体積膨張率 $n=3.0$ を適用し $t=1$ (day) と置くと式(2)', 式(3), 式(4)より、鉄筋の半径増分速度 r_d は以下のように算出できる。

$$\phi_2 = \sqrt{(1-n)\phi_1^2 + n\phi^2} \quad (2)'$$

$$\phi_1 = \phi - 2r_c \cdot t \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

$$\phi_2 = \phi + 2r_d \cdot t \quad (\text{mm}) \quad (4)$$

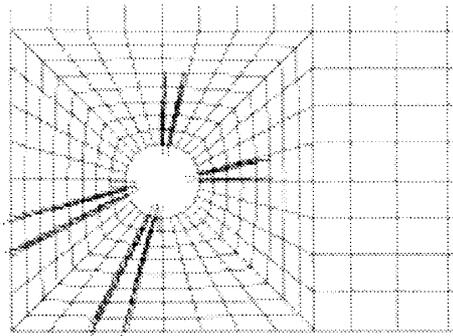
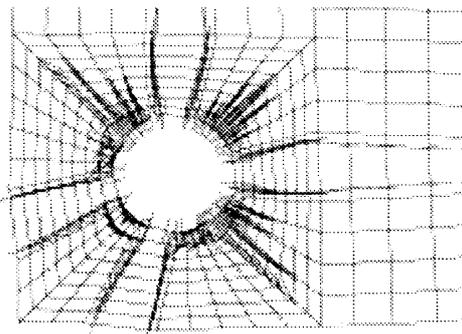
$$r_d = 0.198 \times 10^{-3} \quad (\text{mm/day}) \quad (5)$$

5.3 鉄筋膨張によるひび割れ解析

非線形FEM解析においては、腐食膨張による鉄筋半径の増分(腐食膨張量)として $\Delta R=0\sim 30\mu\text{m}$ まで漸増解析を行い、各ステップでのひび割れ進展状況を調べた。その結果、初めてひび割れが生じたのが腐食膨張量 $\Delta R=0.63\mu\text{m}$ の時点であり、被りコンクリートを貫通してコンクリート表面の要素にひび割れが生じた(以下、初期腐食ひび割れ)のは、腐食膨張量が $\Delta R=1.22\mu\text{m}$ の時点であった。図-7に初期腐食ひび割れ時のひび割れ図、また、図-8に解析最終ステップである $\Delta R=30.0\mu\text{m}$ でのひび割れ図を示す。

初期腐食ひび割れ時には、図-7に見られるように、鉄筋から隅角部のコンクリート表面に向かって斜め方向のひび割れが貫通している。

腐食膨張が進行すると、図-8に見られるように、鉄筋周囲のコンクリートでも複雑なひび割れが生じ、また、表面まで貫通したひび割れひずみの増大に伴って変形が増大している。コンクリート表面位置におけるひび割れ幅の変化を図-9に示す。

図-7 ひび割れ図 ($\Delta R=1.22 \mu\text{m}$)図-8 ひび割れ図 ($\Delta R=30.0 \mu\text{m}$)

初期腐食ひび割れ時 ($\Delta R=1.22 \mu\text{m}$) でのコンクリート表面でのひび割れ幅は、 $h_{cr}=2.16 \mu\text{m}$ であり、その後、ほぼ線形的に増大し、鉄筋増分半径 $\Delta R=30 \mu\text{m}$ では、 $h_{cr}=0.039\text{mm}$ となった。

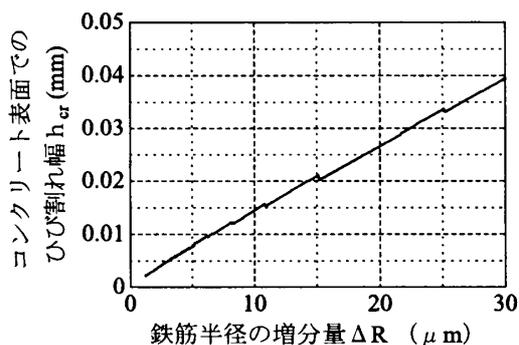


図-9 表面要素のひび割れ幅と鉄筋膨張量の関係

なお、ここでは、解析結果のひび割れ歪みからひび割れ幅を算出した。つまり、ひび割れが生じた表面での要素での等価長さ l_{eq} は、文献¹³⁾を参考に要素の仮想の対角線長をとって面積 A の2倍の平方根 ($l_{eq} = \sqrt{2A}$) とした。表面までひび割れが貫通した要素の面積は $A=15.86(\text{mm}^2)$ であった

ため、これからこのときの要素の等価長さ $l_{eq}=5.63\text{mm}$ が得られ、初期腐食ひび割れ時のひび割れ幅 h_{cr} は、ひび割れひずみ ϵ_{cr} に等価長さ l_{eq} を乗じて求められる。

ここで得られた鉄筋の腐食膨張量について、亀谷らによる検討結果¹²⁾と比較を行う。本解析では、 C/D_s 値 (鉄筋被り/鉄筋直径) は $20.0/12.7=1.57$ であり、コンクリート表面にひび割れが到達した時の腐食膨張量 ΔR は $1.22 \mu\text{m}$ であった。亀谷らの断面隅角部における結果を見ると $C/D_s=1.57$ での限界膨張率 (初期腐食ひび割れ発生時の鉄筋膨張率) は約 $0.1(\%)$ となっている。ここで、文献中での鉄筋膨張率は以下のように定義される。

$$[\text{鉄筋膨張率}(\%)] = \frac{[\text{鉄筋と腐食生成物の断面積変化量}]}{[\text{膨張前の鉄筋断面積}]} \times 100$$

この鉄筋膨張率を腐食膨張量に換算すると $3.171 \mu\text{m}$ となる。本解析で得られた結果 $1.22 \mu\text{m}$ との値の違いについては、本解析では後述の腐食速度を考慮してクリープの影響を無視したが、亀谷らのモデルではクリープを考慮していることなどが考えられる。

5.4 腐食速度とひび割れ幅の検討

腐食による鉄筋半径の増分量と時間の関係は、上述の腐食モデルから算出できる。式(4)で得られた腐食速度より、鉄筋の腐食膨張が始まりコンクリート表面に 0.039mm のひび割れが発生するまでの期間、すなわち鉄筋半径の増分 ΔR が $30.0 \mu\text{m}$ に達するまでの期間は 151.5 日という結果が得られた。

ここで、濱田ら¹⁰⁾の文献と腐食速度及びひび割れ幅について比較検討を行う。濱田らの文献には、被り 2.5cm の鉄筋コンクリートに対する、コンクリート打設からの時間と鉄筋腐食量との関係、腐食量とひび割れ幅の関係が示されている。これらの図から、ひび割れ幅が 0.4mm 発生する腐食量は約 $0.057(\text{g}/\text{cm}^2)$ と読み取ることができ、この腐食量に対する供用期間は約 2600 日と読み取れる。したがって 2600 日で 0.4mm のひび割れが発生するという事ができる。ここで、図-9 に示した結果から、

腐食量とひび割れ幅の関係や時間と腐食量の関係がほぼ線形的に増大すると仮定するならば、本解析で得られた約 151.5 日でひび割れ幅 0.039mm の関係は、約 1515 日で 0.39mm のひび割れに相当すると言えることができる。被り厚が文献中の 2.5cm と本論の 2.0cm という違いなどを考慮すると、ひび割れ幅と併用期間の関係も、オーダー的に妥当であると考えられる。

6. まとめ

コンクリートの炭酸化反応モデルに鉄筋腐食モデル、ひび割れ解析モデルを追加することによりコンクリートのひび割れの開始と進展についての解析を行った。解析結果を以下にまとめる。

- ① 約 30 年で約 2cm の被りコンクリートが中性化した。
- ② 中性化領域が 2cm に達し、鉄筋周辺の pH が低下して鉄筋が腐食し始めると、約 6 日という速さで、微細なひび割れがコンクリート表面まで貫通した。
- ③ コンクリート表面に発生したひび割れは、発錆後約 6 日でひび割れ幅約 0.002mm, 151 日で 0.039mm であった。

これらの解析結果をいくつかの文献^{10), 12)}と比較検討した結果、ほぼ妥当な値と考えられた。今後は、首都高速道路での車線拡幅工事等に伴い撤去される鉄筋コンクリート壁高欄からサンプルを採取して実測値等との比較検討を行い、それにより本解析モデルの精度の向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：炭酸化研究委員会報告書, p. 1, 1993. 3
- 2) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, 土木学会コンクリート委員会, 1997. 2
- 3) 牧野徹, 植木博, 河村隆二, 山崎之典, 村上正明：地球化学コードと有限要素法の連成によるコンクリートの炭酸化反応解析, セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, pp. 59-64, 1996. 5
- 4) 百瀬明貴, 植木博, 山崎之典, 村上正明：コンクリート部材の炭酸化反応に関するシミュレーション解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 729-734, 1996
- 5) 長田光正, 植木博, 山崎之典, 村上正明：アルカリ成分に着目したコンクリート部材の炭酸化反応シミュレーション解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 793-798, 1997
- 6) 植木博・後藤孝治・村上正明・益子直人：空隙構造と化学平衡を考慮したコンクリートの炭酸化反応モデル, コンクリート工学論文集 第 13 巻第 3 号, 2002. 9
- 7) 須田久美子・Misra Sudhir・本橋賢一：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992
- 8) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, Inc, 1985
- 9) 小林悟志・下村匠：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, 2002
- 10) 濱田宏・丸山久一・下村匠・青山敏幸：腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol. 19, No. 1, 1997
- 11) 堤知明・安田登・松島学・大賀宏行：腐食生成物によるひび割れ幅のモデル化に関する研究, 土木学会論文集 NO. 585/V-38, pp. 69-77, 1998. 2
- 12) 亀谷英樹・佐藤靖彦・上田多門・角田興史雄：鉄筋の腐食膨張によるかぶりひび割れ性状の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 18, No. 1, 1996
- 13) J. G. Rots, Computational Modeling of Concrete Fracture, PhD thesis, Delft University of Technology, 1988