

FEM解析を用いた塩害によるRCひび割れ発生メカニズムの検討*

Deliberation for Reinforced Concrete Crack Mechanism by Chloride Induced Deterioration Using FEM Analysis*

白石琢人**・那須清吾***

By Takuto SHIRAIISHI**・Seigo NASU***

1. はじめに

塩分による鉄筋の腐食を原因とするコンクリートひび割れの発生は、中性化や凍害とともにコンクリート構造物の主要劣化要因とされており、ひび割れや腐食に関する研究が行われている。しかし、鉄筋の腐食量と、ひび割れ発生時期についての関係は明確にされていない。

日本のコンクリート構造物は、今後集中して劣化していくと予測されているが、財政悪化による予算制約から、その維持補修費を効率的に運用するためのシステムが必要となっている。日本の各自治体は、橋梁アセットマネジメントシステム（以下BMS）の実用化を目指しており、これは、各橋梁について劣化予測を行い、LCCが最小になるよう適切な補修時期、工法を選択するためのシステムである。ところが、上記のとおり現時点ではひび割れ時期予測が困難であるため、現行BMSは塩害を主な劣化要因として捉えているものの、補修時期及び工法を選択は、鉄筋の不動態皮膜が破壊され、腐食が開始する塩化物イオン濃度に達するまでの時期を基準に行われている。そもそも、コンクリート橋梁において、ひび割れ発生後即座に性能が低下するとは限らないが、BMSのように大量の橋梁についての長期修繕計画を立てる際には、コンクリート内部の劣化状況についても予測しておく必要性はある。

鉄筋の腐食速度は、部位や飛散塩分量の違いにより単一構造物内でも異なってくる。さらに、橋梁に使用される鉄筋及び設計かぶりによって、ひび割れ発生時の腐食量にも違いがあると思われる、コンクリート内部では腐食生成物による膨張圧が作用していると考えられる。本解析では、鉄筋の腐食による体積膨張の圧力を受けるコンクリートの状況をFEM解析で再現し、解析結果から使用している鉄筋の直径、かぶり厚さに応じて変化するひび割れ発生時期の算定方法を検討することで、仮に鉄筋の腐食速度モデルの精度が向上した場合、コンクリートのひび割れ発生時期の予測精度の向上が図られることを目指している。

*キーワード：FEM、塩害、ひび割れ

** E-mail 080467w@ugs.kochi-tech.ac.jp

*** E-mail nasu.seigo@kochi-tech.ac.jp

2. 材料のモデル化

ひび割れ発生時の鉄筋の膨張による変位量をFEM解析で調べるため、コンクリート断面のFEMモデルを作成した。コンクリートは均一な材料として扱い、解析対象のコンクリートの鉄筋部分を空洞として扱い、鉄筋の腐食が均一に起こったと仮定して膨張した鉄筋との付着面に辺荷重を与えていく。辺荷重を徐々に増やしていき、付着面にコンクリートの引張強度を超える最大主応力が計測された時点で初期ひび割れが発生したと判断する。尚、今回は鉄筋付着面に発生する初期ひび割れを想定しているため、解析モデルのメッシュは鉄筋付近のみ細分化している。これを、鉄筋径、かぶり厚を変えたものをモデリングして、それぞれの初期ひび割れが発生する膨張圧及び変位量を計測する。

腐食した鉄筋は鉄と錆の二層構造になっており、鉄筋層は縮小するが腐食層は拡大する。これらの合計としての鉄筋の直径は増大するが、FEM解析で求めた付着面荷重により鉄筋径は圧縮される。鉄筋部分を空洞と仮定したコンクリートのひび割れ解析で求められる空洞部分の直径と、圧縮された鉄筋径が一致するまで繰り返し計算を行い、鉄筋の膨張圧とひび割れ発生時のコンクリートの圧縮圧が均衡されることとで、ひび割れ発生時の応力状態と腐食量が特定できることとなる。

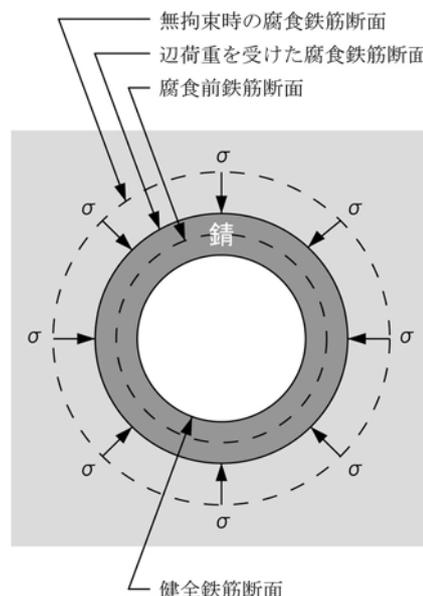


図1 拘束時の腐食鉄筋断面

3. 辺荷重を受ける鉄筋径算出式および模式図

1) 使用材料パラメータ

本研究では、コンクリートを均一な素材として扱い、錆と鉄筋を弾性体であると仮定している。表1に使用材料のパラメータを示す。

表1 材料パラメータ

	コンクリート	鉄筋	錆
圧縮強度 (N/mm ²)	27	-	-
引張強度 (N/mm ²)	2.7	-	-
弾性係数 (N/mm ²)	23 × 10 ³	200 × 10 ³	200
ポアソン比	0.2	0.3	0.2

鉄筋の腐食による体積膨張係数は3.0とした。

2) 鉄筋の腐食モデル

鉄筋が無拘束状態で腐食率がVであるとき、腐食後の鉄筋半径R₁及び錆の厚さR₂を算出する。鉄筋の腐食モデルを図2に示す。式は割愛する。前述のとおり、錆は鉄筋表面に均一に発生するものと仮定している。

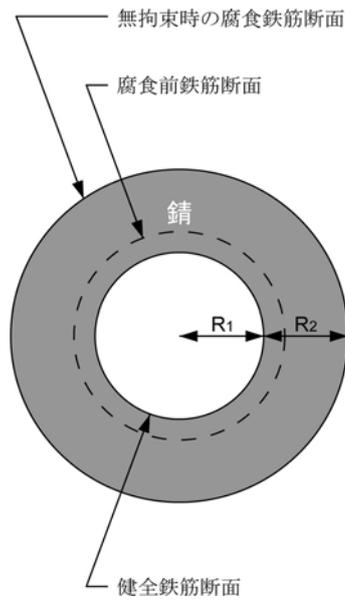


図2 腐食モデル

3) 圧縮後の腐食層と鉄筋の径の減少量

腐食モデルをFEM解析により求めた辺荷重σ₁で圧縮し、腐食層と鉄筋それぞれのひずみを算出し、合計での径の減少量δを求める。減少量δから拘束時の鉄筋径を求める式(1)を示す。ひずみモデルならびに式を図3、式(2)に示す。腐食層のひずみモデルならびに式を図4、式(3)に示す。

$$\delta = 2R_1\varepsilon + 2R_2\varepsilon_1 \quad \dots (1)$$

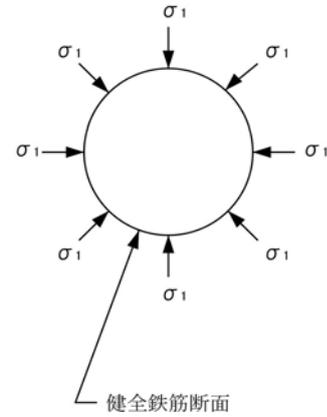


図3 鉄筋のひずみモデル

$$\varepsilon = \frac{(-\sigma_1 + \mu_s \sigma_1 + 2\mu_s^2 \cdot \sigma_1)}{E_s} \quad \dots (2)$$

σ₁ = ひび割れ発生時の辺荷重 (N/mm²)

E_s = 鉄筋の弾性係数 (N/mm²)

μ_s = 鉄筋のポアソン比

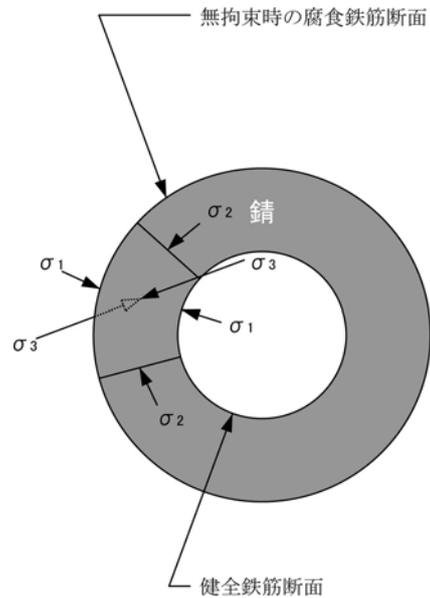


図4 腐食層ひずみモデル

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_R} - \mu_R(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E_R} - \mu_R(\sigma_1 + \sigma_3) \quad \dots (3) \\ \varepsilon_3 &= \frac{\sigma_3}{E_R} - \mu_R(\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \end{aligned}$$

- σ_1 = ひび割れ発生時辺荷重 (N/mm²)
- σ_2 = 軸直角方向応力 (N/mm²)
- σ_3 = 鉄筋方向応力 (N/mm²)
- E_R = 錆の弾性係数 (N/mm²)
- μ_R = 錆のポアソン比

4. FEM解析による腐食膨張を想定した解析

1) 解析手順

鉄筋の腐食膨張によりコンクリートがどのような挙動を示すのか、平面ひずみ二次元FEM解析を行った。本解析では、鉄筋との付着面に発生する初期ひび割れを観測するために、鉄筋から30mmの距離までのメッシュを細分化してある。拘束条件については、図5メッシュ分割例でいえば下面を残して3方向の側面を完全拘束している。これらは全モデル共通の仕様である。

7種類の鉄筋径について、かぶり厚さ30mmから70mmまで10mmおきのモデルを作成し、それぞれ空洞の中心から放射状に鉄筋の腐食による膨張圧を仮定した辺荷重を与えていく。解析結果においてコンクリートの引張強度を超える最大主応力が観測されない場合は、辺荷重を増やして再び解析を行う。本研究では、すべてのモデルで同じ強度のコンクリートを用いている。

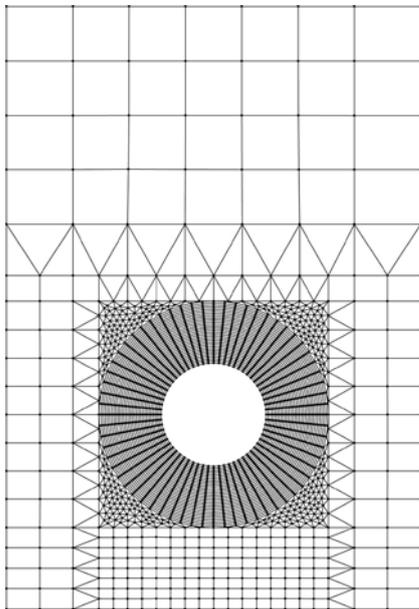


図6 メッシュ分割例
鉄筋D51 かぶり70mm 最小単位1mm

2) 解析結果の判断

コンクリートの引張強度を超える最大主応力が計測された時点でひび割れが発生したと判断し、辺荷重と鉄筋部分の変位量を計測する。尚、コンクリートの引張強度は圧縮強度の0.1倍としている。図6に

引張強度を超えた最大主応力図を示す。

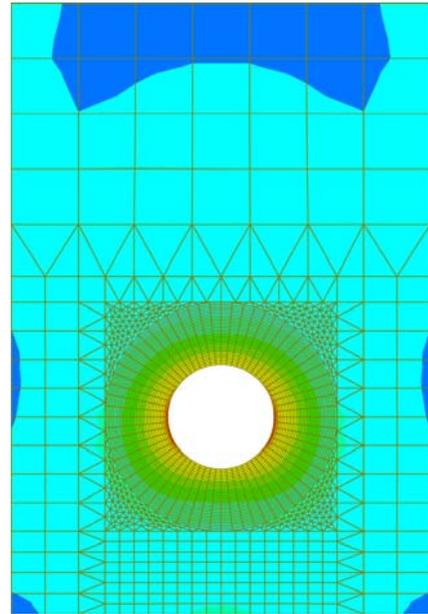


図6 ひび割れ発生時の最大主応力図
鉄筋D51 かぶり70mm

5. 結果

図7、図8にそれぞれひび割れ発生時の腐食膨張圧と、ひび割れ発生時の腐食率を示す。

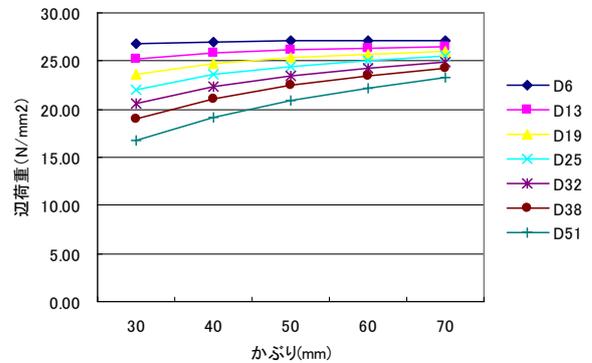


図7 ひび割れ発生時の膨張圧

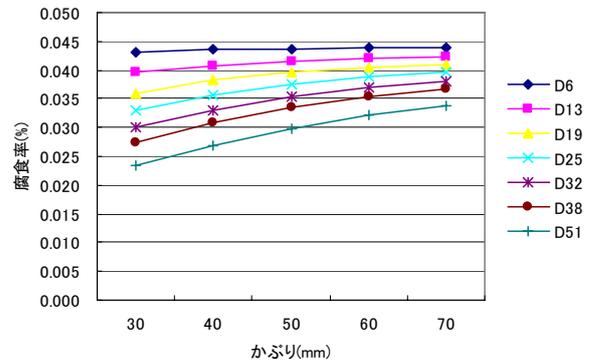


図8 ひび割れ発生時の腐食率

図を見る限りでは、細い鉄筋は太い鉄筋に比べてかぶりによる影響が少ないことが分かった。また、かぶりが厚くなるほど鉄筋径による差が少なくなっているのがわかる。

6. 腐食率予測式の算出

解析結果を元に重回帰分析を行い、本研究で使用したコンクリートである場合の、鉄筋とかぶり厚さからひび割れ発生時の腐食率 V を算出する式(4)を得た。

$$V = 0.000153 \cdot c - 0.000325 \cdot \phi + 0.037672 \quad \dots (4)$$

V = ひび割れ発生腐食率 (%)

c = かぶり厚さ (mm)

ϕ = 鉄筋径 (mm)

表2 コンクリートFc27 重回帰分析結果

回帰統計		係数	標準誤差	t	
重相関 R	0.9704	切片	0.037672	0.00092	40.8
重決定 R2	0.9416	かぶり	0.000153	0.00002	9.7
補正 R2	0.9380	径	-0.000325	0.00002	-20.6
標準誤差	0.0013				
観測数	35				

7. 考察

本研究で、予測していた使用鉄筋とかぶり厚さの違いによるひび割れ発生時の腐食率の違いを確認することができた。グラフの推移を見る限りでは、鉄筋径が太いほどかぶり厚さによる影響を受けやすく、逆に細い鉄筋ではかぶりによる影響は少ない。かぶり厚さ、鉄筋太さに一定の規則性があるように考えられる。仮に鉄筋とかぶりに関係性があるとするなら、今後腐食速度モデルの研究が進めば、本研究を更に発展させたひび割れモデルと組み合わせることで予測精度も向上すると思われるが、その際には、今回の解析結果に見られた鉄筋とかぶりの関係をさらに明確化しておく必要があるだろう。しかしながら、今回の解析は実際の橋梁のような曲げモーメントとせん断力は考慮しなかったため、実際の鉄筋コンクリートが結果のような挙動を示すとは限らないことを考慮する必要はある。今後、さらに実橋梁に近い解析を行う必要があるだろう。

今後の課題として、本研究においてはすべてのモデルで同一のコンクリートを扱ったが、より実用性のある予測式を算出するためには、使用コンクリートの強度や、先に述べた曲げモーメント・せん断力を考慮した解析を

行う必要がある。さらに、かぶり厚さにおいても実橋梁では 100mm 前後で施工される例や、施工不良などで 30mm 以下になってしまうこともあるので、注意が必要である。

8. 謝辞、参考文献

1) 謝辞

本研究を進めるに当たり、本研究室の那須清吾教授には多くのご指導・ご助言を頂きました。厚くお礼申し上げます。また、同研究室の坂元さん、宮田さん、高知工科大学、穴見研究室の亀崎さんからも多大なアドバイスを頂きました。ここに感謝を示します。

2) 参考文献

- ・元路寛・関博：「離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅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. 21, No2, 1999
- ・山田義智・大城武：「破壊力学に基づく FEM による縦ひび割れ発生腐食量の解析的検討」コンクリート工学年次論文報告集、Vol115, N01, 1993
- ・土木学会：2001 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]