

ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく構造・耐久連成解析システムの高精度化

鈴木 三馨^{*1}・福浦 尚之^{*1}・丸屋 剛^{*1}

Keywords : Corrosion Weight Loss at Concrete-cracking, Developed Phase, Corrosion Product, Expansion Rate, Coupled Analysis
ひび割れ発生限界腐食量、進展期、腐食生成物、膨張率、連成解析

1. はじめに

コンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁾では、塩害により鋼材腐食が生じる鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の劣化過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分している。

著者らはこれまでに、RC構造物中の塩害による劣化の機構をシミュレートするため、鉄筋の腐食に関する構造と耐久性解析との連成解析システムを構築してきた²⁾。この連成解析システムは、荷重作用に関する3次元非線形構造解析モデルとFEMを用いた鉄筋腐食に関する2次元耐久性解析モデル、そして、各解析モデル中の材料挙動に相互の解析結果を反映させる相互作用モデルを組み合わせたものである。

劣化過程の予測には、鉄筋の腐食進行メカニズムが重要であるが、これまでには解析システムの枠組を示したものであり、劣化過程の予測に対して十分な精度が確認できていない。今回、鉄筋の腐食膨張のモデル化を検討して、本システムの高精度化を図り検証解析を行った。検証対象は、進展期から加速期への移行時期の鉄筋の腐食量であるひび割れ発生限界腐食量とした。

本研究では、まず、ひび割れ発生限界腐食量に関する既往の文献³⁾⁻¹³⁾の再整理を行った。次に、RC構造物中の鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの応力状態を確認するため、FEM解析による簡易なひび割れ進展解析を行った。さらに、RC中の鉄筋が受ける拘束圧を再現した電食実験を行い、拘束下における鋼材の腐食生成物の膨張率を測定した。これらの結果を踏まえた上で、連成解析システムを用いて腐食生成物の膨張率のモデル化に関するパラメータ解析を行い、既往の腐食

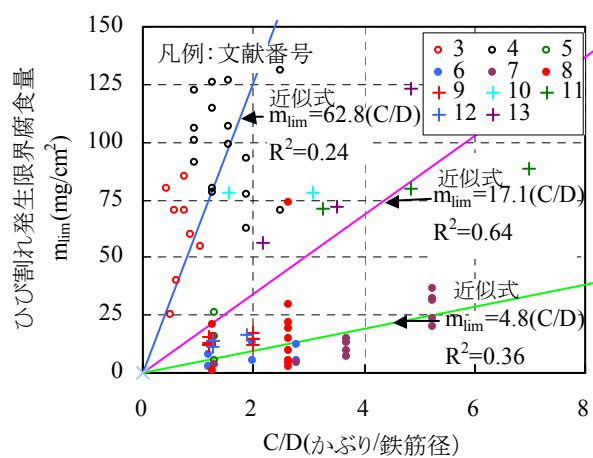


図-1 C/D-ひび割れ発生限界腐食量の関係
Fig.1 C/D vs corrosion weight loss at cracking

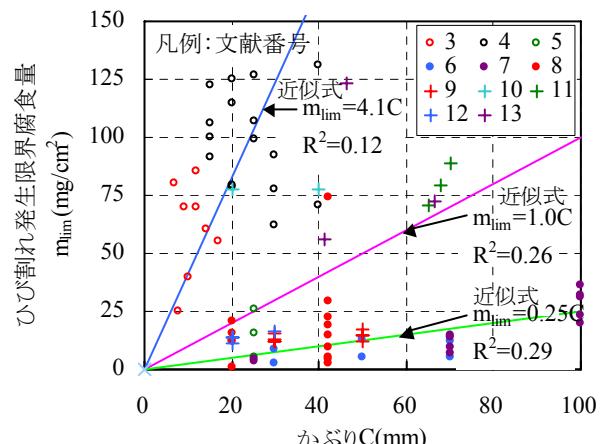


図-2 かぶり-ひび割れ発生限界腐食量の関係
Fig.2 Cover vs corrosion weight loss at cracking

ひび割れに関する実験との比較により解析検証を行った。

2. 既往実験によるひび割れ発生限界腐食量

既往の実験³⁾⁻¹³⁾のひび割れ発生限界腐食量を整理し

* 1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

た。図-1にC/D(かぶり/鉄筋径)-ひび割れ発生限界腐食量の関係を、図-2にかぶり-ひび割れ発生限界腐食量の関係を示す。引用した文献では、鉄筋の促進腐食環境、ひび割れ発生の判定基準や腐食量の測定方法などが異なっているが、同一のグラフにプロットした。また、文献3)のみ、せん断補強鉄筋が配筋されている。

ひび割れ発生限界腐食量の定義は、ひび割れが生じた時点での腐食量を、実際に腐食した面積あたりに換算するものと、鋼材の全表面積で除するものがある。解析では腐食量を平均した値として用いるため、ひび割れ発生限界腐食量は極力、後者でまとめた。表-1に実験条件を示す。

図-1より、ひび割れ発生限界腐食量は、乾湿繰返し試験の文献3), 4)で、比較的大きな値となっている。文献5)のひび割れ判定基準がヘアクラック観察時の場合、ひび割れ発生限界腐食量がかなり小さい。これより、ひび割れ発生限界腐食量は腐食発生条件によりもひび割れ判定基準の違いによるところが大きいと考えられる。

図-1より、C/D、かぶりが大きくなるほどひび割れ発生限界腐食量が大きくなる傾向にある。

図-1、図-2に、実験ケースにおけるそれぞれの近似式と相関係数Rを2乗した重相関関数R²値を示す。乾湿繰返し試験によるものよりも電食によるもので整理したほうがR²値は大きくなることから、ひび割れ発生限界腐食量は乾湿繰返しによるものよりも電食によるものの方がばらつきの幅が小さくなっているが、これはひび割れ判定基準によるところが大きいと考えられる。また、かぶりよりもC/Dで整理した方がR²値は大きいことから、ひび割れ発生限界腐食量はかぶりよりもC/Dで整理した方がばらつきの幅が小さくなると考えられる。

表-1 実験条件

Table.1 Experimental conditions

実験 ケース	○印	●印	+印
腐食 発生条件	乾湿繰返し試験 によるもの	電食試験によるもの	
ひび割れ 判定条件	目視観察によるもの 文献3), 4) : 0.1mm以上 文献5) : ヘアクラック 観察時	表面ひずみの急変部, あるいは 600×10^{-6} 以下のもの	不明

3. 2次元FEM解析によるひび割れ進展解析

腐食生成物の腐食膨張は、自由膨張と拘束下では異

なるとされており¹⁴⁾、RC構造物中の鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの応力状態の変化を知ることは劣化予測に重要である。実験ではこの応力は計測できなかったため、FEM解析によりRC中の鉄筋の腐食膨張によるコンクリートの応力状態を確認した。

図-3に解析モデルを示す。コンクリート圧縮強度40N/mm²、鉄筋径Dを16mm、かぶりCを25, 40, 60mmとした3ケースの解析を実施した。半径方向のみに内径膨張 Δu を強制変位として与えて鉄筋の腐食膨張を模擬した。要素は平面応力要素を用い、材料特性は圧縮側を弾性体($E_c=31,000\text{N/mm}^2$)とし、引張側には $f_t=2.7\text{N/mm}^2$ としてコンクリート標準示方書〔設計編〕で示されている無筋コンクリートの引張軟化曲線を与えた。解析は汎用有限要素解析プログラムABAQUSを用いた。

図-4に内径膨張 Δu -拘束圧の関係を示す。拘束圧は半径方向の反力を周長で割った値とした。図-4より、鉄筋周りに生じる初期ひび割れはかぶりの影響を大きく受けず、その後、かぶりが大きいほど表面にひび割れが到達する時の拘束圧は大きくなる。ひび割れはその後も進行するが、わずかに拘束圧は上昇し、ひび割れが表面に到達すると低下する。この過程で表面ひび割れが目視で確認できるほどに開口していくものと考えられる。

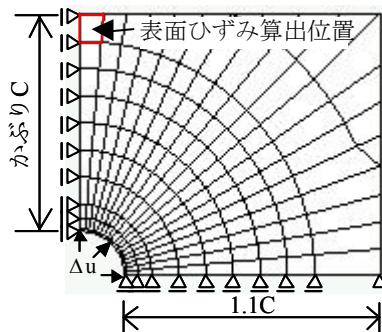


図-3 2次元FEM解析モデル
Fig.3 2D FEM model

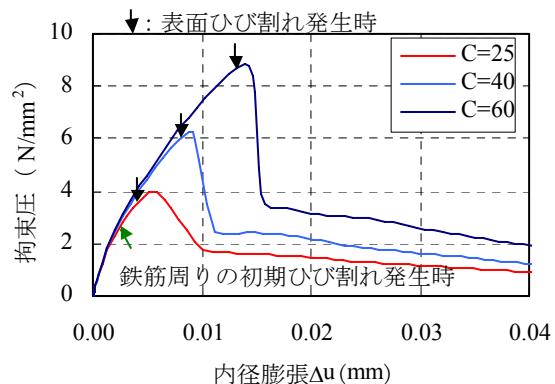


図-4 内径膨張-拘束圧の関係
Fig.4 Internal expansion vs confined pressure

解析より、腐食生成物の膨張によりコンクリートの周方向には引張応力が発生し、半径方向には圧縮応力が発生する。最大拘束圧はかぶりが 25, 40, 60mm のときに、それぞれ 4, 6, 8N/mm² 程度となる。

4. 拘束下の腐食生成物の膨張率

3 章よりコンクリート中の鉄筋が腐食した時には、腐食生成物には拘束圧が発生し、表面初期ひび割れが発生するとわずかに拘束圧が上昇したのち、低下することが示された。腐食生成物の膨張率は劣化予測の上で重要な物性値となる。著者らは既往の実験 14) を参考に腐食生成物の膨張率を測定する実験 15)を行ったが、既往の知見と比べて得られた膨張率が大きく、計測データの信頼性が低い可能性がある。そこで、実験方法を改良した上で、3 章の解析に基づき RC 構造物中の鉄筋が受ける応力状態を再現し、腐食生成物の膨張率を測定するために電食による実験を再度実施した。

図-5 に試験体の概要、図-6 に試験体写真を示す。直方体に切り出した鋼材 (SS400) の研磨した 40×40mm の 2 面に対し、モルタル (W/C=60%, S/C=2.5, 初期塩分 2.0kg/m³) を直接打設し、182×40×40mm の試験体を製作した。試験体は、鋼板で直接挟み、丸鋼 ($\phi 20$) 4 本により拘束した。試験体寸法と丸鋼の径は拘束の剛性を想定している状態になるべく近づけるよう設定した。腐食生成物の外部への流出を防ぐため、鋼材を挟んだ 102mm の区間はアクリルゴム系表面被覆材によりコーティングし、対極は銅板とした。腐食膨張により生じる拘束圧は丸鋼のひずみから算出し、腐食膨張を含む試験体の変形は、側面 4 面に設置した変位計により計測した。

試験体は材齢 30 日以上水中に設置し、湿潤膨張によるひずみが収束した後、通電を開始した。電流は 10mA とした。試験体は 3 体あり、拘束圧が 4, 6, 8N/mm² になった時点でそれぞれ拘束圧を緩めた。解析上は考慮できないひび割れの進展とひび割れ内への腐食生成物の充てんの繰返し作用を想定し、その後、10N/mm² 以上になった後に拘束圧を 4 回緩めた。表-2 に試験体名を示す。

試験体解体後、鋼材を JCI-SC1 「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠するように、10%クエン酸二アンモニウム溶液 (液温 60°C) に 7.5 時間浸漬して、腐食生成物を除去し実験前後の鋼材の質量差を測定した。解体後の腐食量は、これを腐食面積 3200mm² (40×40mm の 2 面) で割った値とした。解体前の腐食量は、積算電流量と腐食量が比例関係にあるとし、

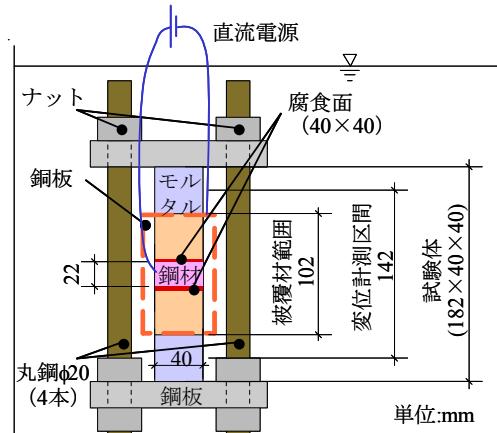


図-5 試験体概要
Fig.5 Experimental apparatus

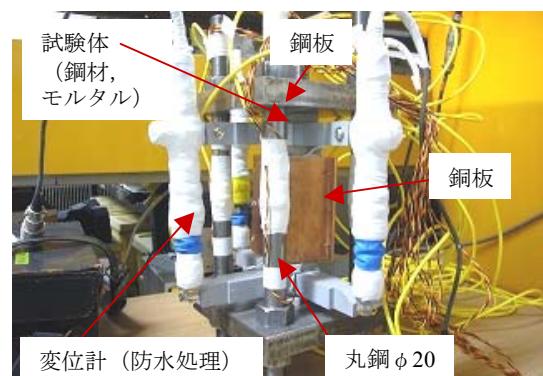


図-6 試験体写真
Fig.6 Experimental picture

表-2 試験体名
Table.2 List of specimens

試験体名	拘束を緩めた時の拘束圧 (N/mm ²)
C25	4
C40	6
C60	8

腐食量を算定する時点までの積算電流量を解体後の腐食量に乘じ、解体時点までの積算電流量で除した値とした。膨張率 α は腐食生成物の膨張幅 $\alpha \Delta t$ と鋼材の減少幅 Δt との比とした。鋼材の片面一面に対する減少幅 Δt は腐食量 m と密度 ρ (7870mg/cm³) との比とした。膨張幅 $\alpha \Delta t$ を式(1)に示す。

$$\alpha \Delta t = \frac{L_{\text{measure}} + 2\Delta t + \Delta l_{\text{stress}}}{2} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha \Delta t$: 膨張幅 (mm), L_{measure} : 計測変位 (mm), Δt : 鋼材の減少幅 (mm), Δl_{stress} : 丸鋼のひずみから算出される計測区間におけるモルタルと鋼材の拘束応力による縮み量 (mm)

図-7に膨張幅 $\alpha\Delta t$ -腐食量mの関係、図-8に膨張率 α -腐食量mの関係、図-9に膨張率 α -拘束圧の関係、図-10に内径膨張 Δu -拘束圧の関係を示す。実験での内径膨張は $\Delta u=(\alpha-1)\Delta t$ とした。

図-7より、膨張幅がほぼ線形に増加していることから、本電食実験による腐食速度はほぼ一定であることが分かる。図-8より、膨張率 α は腐食量が0~30mg/cm²の時、多くのノイズを含んでいる。これは、減少幅 Δt が0~0.04mmと小さく、膨張幅 $\alpha\Delta t$ の計測精度が十分でないことが考えられ、また、試験体を研磨した鋼材とモルタルを用いることで鋼材とモルタル間の界面の空隙を抑えているが、腐食量が小さい時には、この影響を受けていることも考えられる。図-8に示す膨張率は、腐食量0~30mg/cm²ではノイズの影響を無視すると1.0~2.5の範囲にあり、腐食量が70mg/cm²以降になると膨張率は3.0~4.0の範囲に収束する傾向にある。

図-9により、拘束圧を変化させる過程で膨張率に大きな変化は見られなかった。図-10より、実験の初期剛性は解析の値に比べ低い結果となったが、実験の初期剛性は試験体寸法と丸鋼の径に依存する値である。今試験体は実験可能な試験体形状で、解析の初期剛性に近づけたものである。図-11に、電食実験後の鋼材

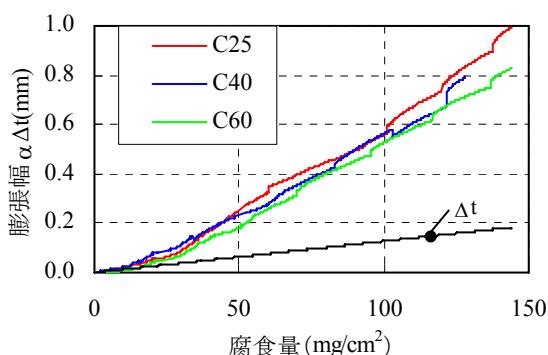


図-7 膨張幅-腐食量の関係
Fig.7 Expansion width vs corrosion weight

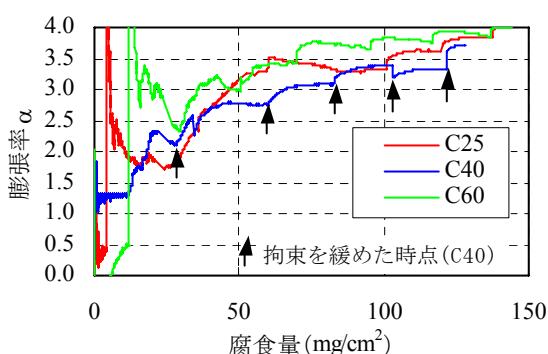


図-8 膨張率-腐食量の関係
Fig.8 Expansion rate vs corrosion weight

の腐食面における腐食生成物の状況を示す。腐食生成物は黒色と褐色のものが混在している。同様の環境下に置かれた腐食生成物を粉末X線回折で分析したところ、褐色のゲーサイト(FeO(OH))と黒色のマグネタイト(Fe₃O₄)が主な生成物であった。自然環境下での腐食生成物は電食による腐食生成物とは異なると考えられることから、これについては検討の余地がある。

5. 連成解析システムの検証

2~4章の結果を踏まえて、腐食膨張のモデル化を行

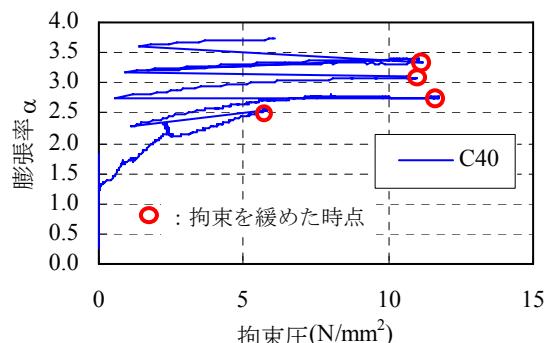


図-9 膨張率-拘束圧の関係
Fig.9 Expansion rate vs confined pressure

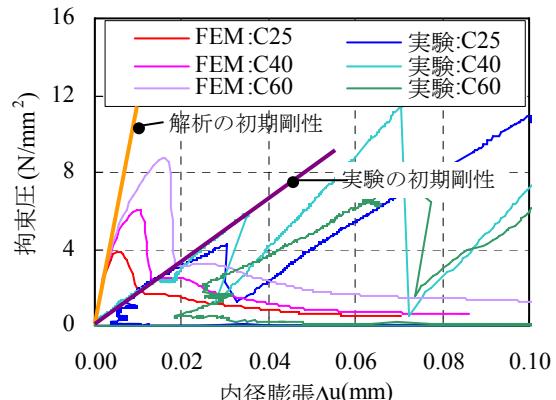


図-10 内径膨張-拘束圧の関係
Fig.10 Internal expansion vs confined pressure

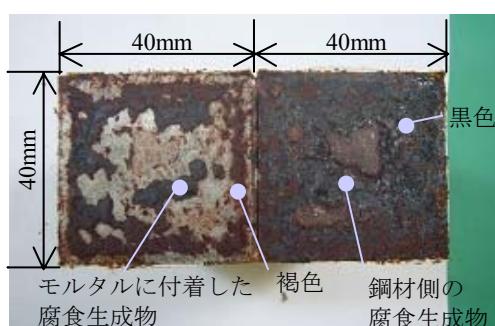


図-11 腐食生成物の状況
Fig.11 Corrosion product
い連成解析システムの高精度化を図った。

5.1 連成解析システムの構成

図-12に連成解析システムの基本構成を示す。本システムの耐久性解析は、乾湿繰返し環境によるマクロセル腐食回路形成に関する解析手法を取り入れているが、今回、電食実験を再現するために、耐久性解析は腐食電流密度を一定として腐食速度を制御した。構造解析では、コンクリートをソリッド要素、鉄筋をトラス要素で表し、鉄筋断面に相当する部分をソリッド要素として鉄筋と周辺コンクリートとの相互作用を表すインターフェイス要素としている（図-13）。

3章で示したFEM解析では腐食した鉄筋の内径膨張を強制変位で表しているため、鉄筋の腐食量と腐食膨張による内径膨張の関係を考慮することができていなかった。しかし、本システムでは、腐食膨張に関しては、インターフェイス要素に拘束下の膨張ひずみとして与えることで考慮可能となった（図-14）。

5.2 腐食膨張のモデル化と解析検証

腐食膨張をモデル化した連成解析システムにより、ひび割れ発生限界腐食量を試算した。解析対象は、鉄筋径D（16, 32mm）、かぶりC（14, 22, 34, 42, 64, 72, 94, 102mm）とした。

腐食膨張のモデル化は、4章の実験で得られた膨張率に基づき設定したもので、鉄筋の半径方向の増加率

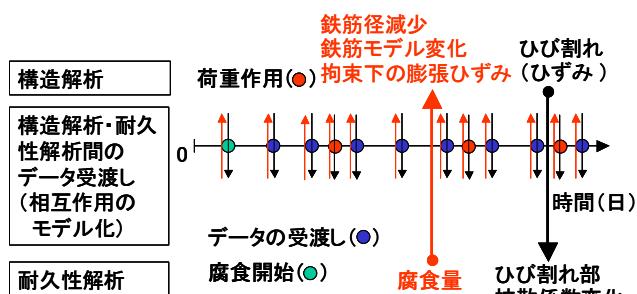


図-12 連成解析システムの基本構成²⁾
Fig.12 Basic configuration of coupled analysis system

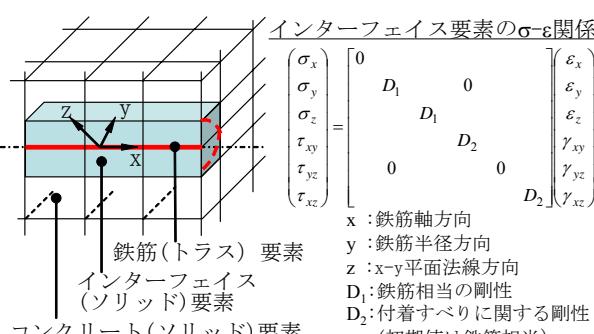


図-13 鉄筋とコンクリート間の有限要素モデル²⁾

したことから腐食生成物の剛性も考慮したものとな

る。また、4章より、膨張率はRC中の鉄筋の腐食発生・進展過程下では、拘束圧の影響をほとんど受けないことから拘束圧に依存しないモデルとした。解析パラメータは腐食生成物の膨張率 α を3章の実験に基づき、一定としたケース（ $\alpha=1.05, 1.1, 1.25, 1.5, 2.0$ ）と4章の実験値（図-8）を参考に、腐食量により変化させたケースとした（図-15）。解析はこれらのパラメータの組合せを絞り計36ケースを実施した。

図-16に解析モデルを、図-17に解析結果例を示す。電食実験の電流速度は場所によらず一定のため、厚さ方向は1要素とし、境界条件はモデルが回転しないように設定した。表面ひずみ算出位置は表面ひずみが増加した要素とし、ひび割れ発生時点をコンクリート表面のひずみの急変部とした（図-18）。

図-19に、図-1の実験値の一部に解析値を重ね合わせたC/D-ひび割れ発生限界腐食量の関係を、図-20に、図-2の実験値の一部に解析値を重ね合わせたかぶり-ひび割れ発生限界腐食量の関係を示す。比較対象の実験は、ひび割れ判定基準をコンクリート表面のひずみとしている文献6), 7), 8)とした。

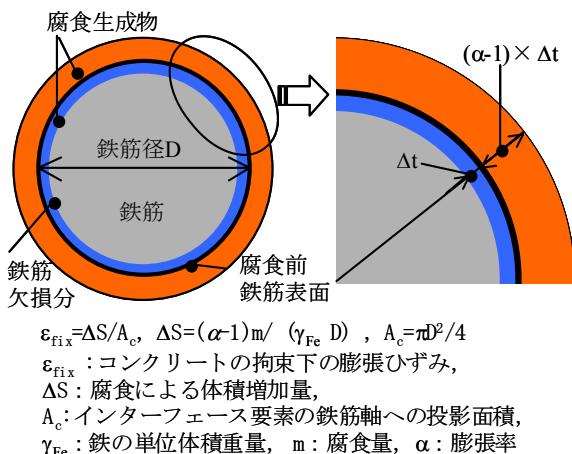


図-14 腐食膨張のモデル化
Fig.14 Modeling of corrosion expansion

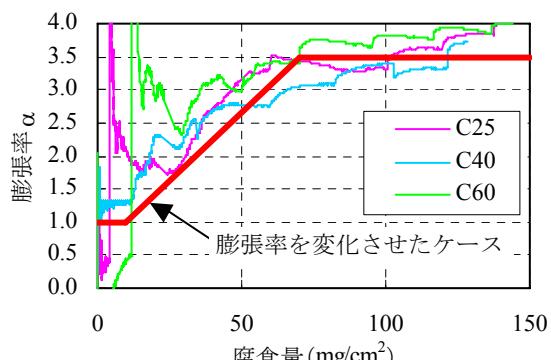


図-15 3章の実験に基づく膨張率の設定
Fig.15 Modeling of expansion rate under 3 chapter experiments

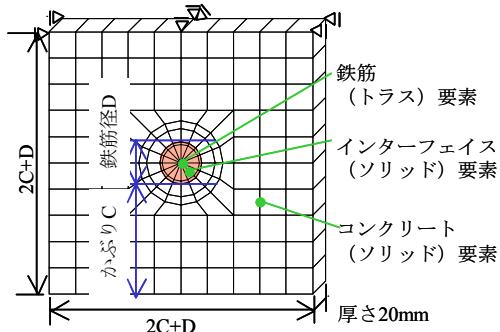


図-16 FEM 解析モデル ($D=16\text{mm}$, $C=42\text{mm}$, $C/D=2.6$)
Fig.16 FEM model ($D=16$, $C=42\text{mm}$, $C/D=2.6$)

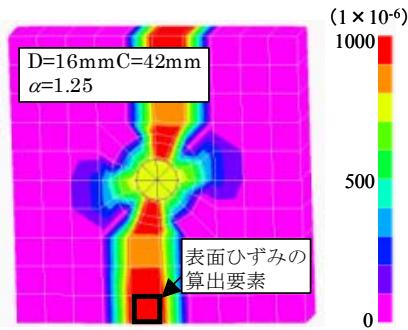


図-17 解析結果（最大主ひずみ）
Fig.17 Analysis result (max major strain)

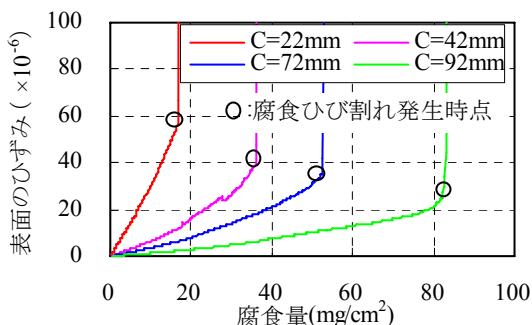


図-18 腐食量-表面ひずみ関係 ($D=16$, $\alpha=1.1$)
Fig.18 Corrosion weight vs concrete's strain

ひび割れ発生限界腐食量は、かぶりで比較した場合鉄筋径が異なると同じかぶりに対し異なるひび割れ発生限界腐食量が算出されるが（図-20 内に表記）、 C/D で比較した場合異なる鉄筋径でも C/D が同じなら同じひび割れ発生限界腐食量となる（図-19 内に表記）。既往実験において C/D とひび割れ量の相関が高いことが示されているが、解析においても同様の傾向が得られている。

また、図-19 より、膨張率が 1.1~2.0 の範囲内に、ひび割れ基準が 600×10^{-6} 以下の実験結果（文献 6, 7, 8）の値をほとんど含んでいる。膨張率を変化させたケースにおいても、ひび割れ発生限界腐食量は

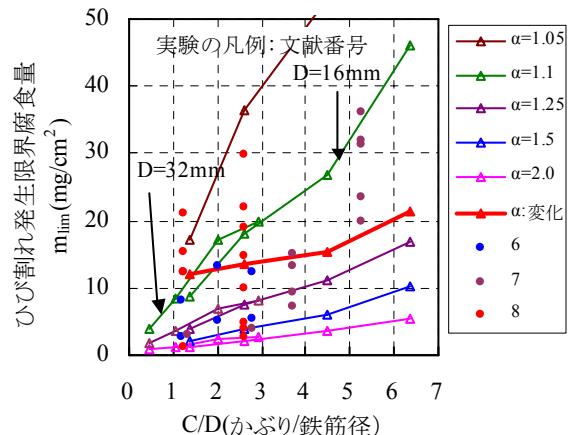


図-19 C/D -ひび割れ発生限界腐食量関係
Fig.19 C/D vs corrosion weight loss at cracking

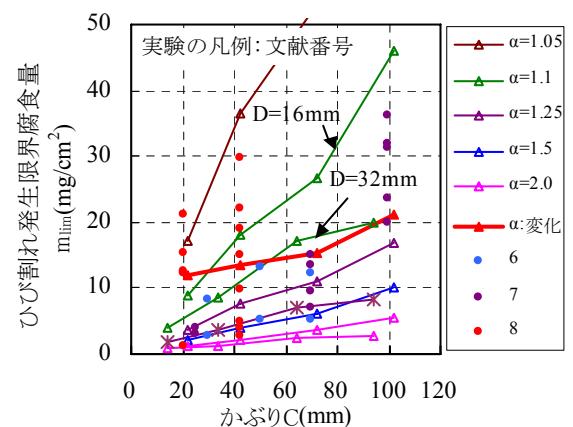


図-20 かぶり-ひび割れ発生限界腐食量関係
Fig.20 Cover vs corrosion weight loss at cracking

$10\text{mg}/\text{cm}^2 \sim 20\text{mg}/\text{cm}^2$ となった。図-15 での膨張率が 2.0 になる以前にひび割れが発生する解析結果となった。

4 章の実験では、膨張率は腐食量 $70\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度まで増加し、それ以降は 3.0~4.0 で収束する傾向にあり解析結果と傾向が異なる。これは、以下の理由によるものと考えられる。

- 1) 実験では研磨した鋼材とモルタルを用いることで両者の界面の空隙への充てんの影響を減らしているが、実際の RC 部材の鉄筋とコンクリートの界面の空隙はこれよりも大きいと考えられることを考慮すれば、RC 中の見かけの膨張率は 4 章の実験結果よりも小さくなる。
- 2) 比較対象とした既往実験では、腐食量 $40\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度以下でひび割れが発生しており、その範囲においては膨張率は最大でも 2.5 程度である。

これより、本連成解析システムにおいて膨張率を 1.1 ~2.0 とすることで、かぶりや鉄筋径の各種条件下におけるひび割れ発生限界腐食量を概ね表現できるものと

考えられる。

6.まとめ

- 本研究によって得られた知見は、以下の通りである。
- (1)既往実験によるひび割れ発生限界腐食量は、ひび割れ判定基準による影響が大きく、これをひずみ急変部とした場合、データのばらつきが小さくなる。かぶりよりも C/D で整理することでばらつきは若干小さくなる。
 - (2)FEM 解析より、腐食膨張による鉄筋周りの最大拘束圧はかぶりが 25, 40, 60mm のときに、それぞれ 4, 6, 8N/mm² 程度となる。
 - (3)電食実験により RC 構造物中の鉄筋が受ける応力状態を再現して計測した腐食生成物の膨張率は、拘束状態の影響をあまり受けず、腐食量が 0~30mg/cm² までは 1.0~2.5 と漸増し、70mg/cm² 以降は 3.0~4.0 の範囲にある。
 - (4)連成解析システムにより、ひび割れ発生限界腐食量について検証解析をした結果、腐食生成物の膨張率を 1.1~2.0 とすることで既往実験の値を概ね良くシミュレートすることができた。ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率を定量化の基づく構造・耐久連成解析システムを高精度化することができた。

今後は、RC 部材の劣化時挙動予測に連成解析システムを適用するための検証解析および高精度化を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会 : 2007 制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], pp.101-103, 2007.
- 2) 福浦尚之, 丸屋剛, 武田均, 小山哲 : 鉄筋腐食による材料劣化と荷重作用の連成解析システムの構築に関する一検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 5-073, pp.145-146, 2007.
- 3) 松島学, 横田優, 関博 : 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004.
- 4) 中川裕之, 田中大博, 横田優, 松島学 : 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.
- 5) 堀口賢一, 丸屋剛, 武若耕司 : 塩害環境下における鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ発生時期の推定, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 5-533, pp.1065-1066, 2007.
- 6) 森川雅行, 関博, 奥村隆 : 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.378, V-6, pp.97-105, 1987.
- 7) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典 : 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988.
- 8) 鈴木三豊, 堀口賢一, 福浦尚之, 丸屋剛 : 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1081-1086, 2009.
- 9) 梅村靖弘, 飯島知哉, 原田宏 : 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面応力の挙動, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, 5-114, pp.254-255, 1993.
- 10) 横田優, 佐々木孝彦, 飯島亨, 松島学 : 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1041-1046, 2004.
- 11) G.J.Al-Sulaimani, M.Kaleemullah, I.A.Basunbul, Rasheeduzzafar: Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members, ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol.87, pp.220-231, 1990.
- 12) C.Andrade, C.Alonso, F.J.Molina: Cover cracking as a function of bar corrosion; Part1: experimental test, Materials and Structures, Vol.26, pp.453-464, 1993.
- 13) Ghanderari M, Zulli M, Ahah S.P.: Influence of corrosion on bond degradation in reinforced concrete, fourteenth engineerion mechanics conference, ASCE, 2000.
- 14) 吉岡保彦, 米澤敏男 : 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, 5-136, pp.271-272, 1982.10.
- 15) 鈴木三豊, 福浦尚之, 丸屋剛 : 拘束下における鋼材の腐食生成物の膨脹率の測定と腐食ひび割れの進展解析, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 5-533, pp.1065-1066, 2009.