

拘束下における鋼材の腐食生成物の膨張率の測定と腐食ひび割れの進展解析

大成建設(株) 土木技術研究所 正会員 ○鈴木 三馨
 大成建設(株) 土木技術研究所 正会員 福浦 尚之
 大成建設(株) 土木技術研究所 フェロー会員 丸屋 剛

1. 目的

鉄筋コンクリート(以降, RC) 構造物における腐食ひび割れの発生と, その後の腐食劣化した部材の構造的な性能評価を精度良く求める手法¹⁾などを構築するには, 鋼材の腐食生成物の物性を明らかにすることが必要とされる。

本研究では, 腐食生成物の膨張率を定量化する目的で, 拘束圧を受けた鋼材を電食により腐食させ, 腐食生成物の膨張率 α を計測する実験を行った。また, FEM 解析により, 腐食ひび割れ進展過程における RC 中の腐食した鉄筋周りの応力・変形状態について検討した。

2. 拘束下における腐食生成物の膨張実験

電食による実験を吉岡・米澤の研究²⁾を参考にして実施した。

図-1に試験体の概要を示す。直方体に切り出した鋼材(SS400)の研磨した50×50mmの二面に対し, モルタル(W/C=60%, S/C=2.0, 初期塩化物イオン濃度2.1kg/m³)を打設し, 222×50×50mmの試験体を製作した。試験体は, 鋼板と丸鋼($\phi 6$, $\phi 10$, $\phi 20$ の三種類)4本により拘束した。鋼板と試験体の間には, 断面に一樣の拘束を与えるために, 不陸調整用の厚さ1mmの硬質ゴムを設置した。鋼材を挟んだ122mm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た。対極は銅板とし, 媒質(水道水)に浸っている両側面および底面を幅100mmで囲んだ。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, 上面に設置した変位計

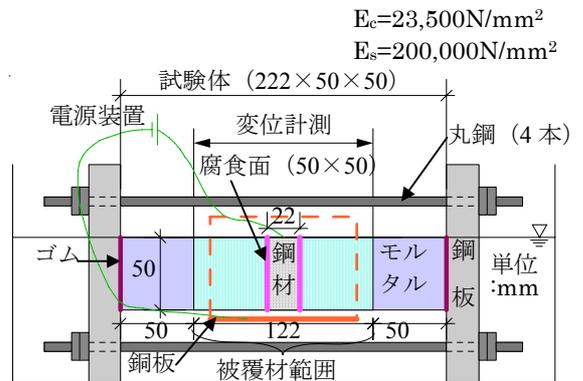


図-1 試験体の概要および実験方法

により計測した。試験体は材齢34日から水中に設置し, 湿潤膨張によるひずみが収束したと考えられる材齢38日後から通電を開始した。電流密度は, 高電圧になるのを避ける目的で積算電流量が1630mA・hになるまで5A/m²とし, それ以降を1A/m²とした。RC中では鉄筋の腐食膨張によりひび割れが発生する際には拘束圧が低下すると考えられることから, 拘束圧が8N/mm²程度の時に拘束を緩めて再度通電を開始した。

図-2~図-4に膨張幅-積算電流量関係, 膨張率-腐食量関係および膨張率-拘束圧関係をそれぞれ示す。腐食量 m は式(1)に示すファラデーの法則より算出した。膨張率 α は腐食生成物の膨張幅と鋼材の減量幅 Δt との比とした。鋼材の片側一面に対する減量幅 Δt は腐食量 m と密度 ρ (7870mg/cm³)との比とした。膨張幅は式(2)に示す。

$$m = \frac{I \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \cdot \xi \quad (1)$$

ここに, m : 腐食量 (mg/cm²), I : 腐食電流密度 (mA/cm²), t : 時間(s), a : 鉄の原子量 55.845 (g),
 n : 溶解した鉄イオンの当量 2 (mol eq.), F : ファラデー定数, 96500 (C/mol eq.), ξ : 電食係数 1.0

$$\text{膨張幅} = \frac{(\text{計測変位}) + (2 \times \text{鋼材の減量幅} \Delta t) + (\text{モルタルと鋼材の拘束応力による縮み量})}{2} \quad (2)$$

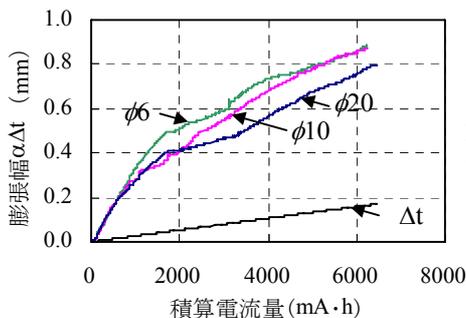


図-2 膨張幅-積算電流量関係

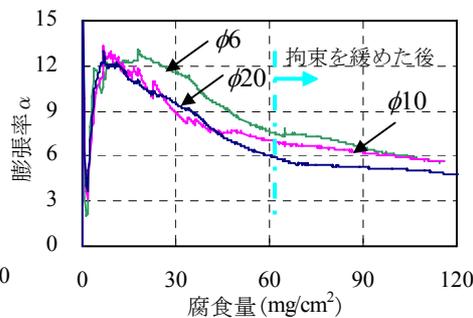


図-3 膨張率-腐食量関係

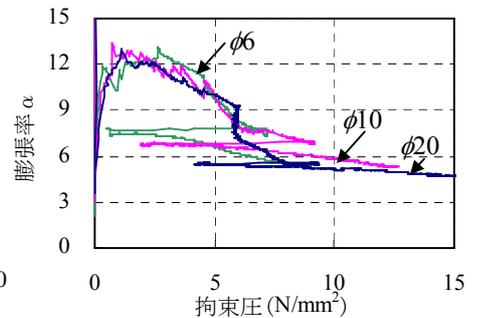


図-4 膨張率-拘束圧関係

キーワード 腐食生成物, 膨張率, 拘束圧, 電食

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7230

本実験では、腐食量が $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度までは膨張率 α が増大し、その後は緩やかに減少している (図-3)。腐食初期の増加傾向については、鋼材とモルタル界面に存在する空隙へ腐食生成物が一部充填されたことによると考えられる。計測された膨張率 α は、拘束材の丸鋼の径によらずほぼ同程度であり、既往の実験²⁾と比較すると拘束下 ($\alpha=3\sim 4$) よりも自由膨張下 ($\alpha=4\sim 8$) に近い値となった。これは、不陸調整用の硬質ゴムの剛性が相対的に小さいことから、本実験における腐食面に対する拘束が小さくなってしまったことによる。また、拘束を緩めた以降の膨張率 α の減少性状については大きな変化がないことから (図-3～図-4)、腐食生成物の膨張率 α は拘束圧の変化の影響をあまり受けないものと考えられる。

3. FEMによる2次元ひび割れ進展解析

RC中の鉄筋の腐食膨張について、FEMによるひび割れ進展解析を行った。図-5に解析モデルを示す。コンクリート強度を $40\text{N}/\text{mm}^2$ 、鉄筋径 16mm とし、かぶり C を $25, 40, 60\text{mm}$ とした3ケースを実施した。半径方向のみに強制変位 Δu を与えて鉄筋の腐食膨張を模擬した。材料特性は圧縮側を弾性体 ($E_c=31,000\text{N}/\text{mm}^2$) とし、引張側には $f_t=2.7\text{N}/\text{mm}^2$ 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。

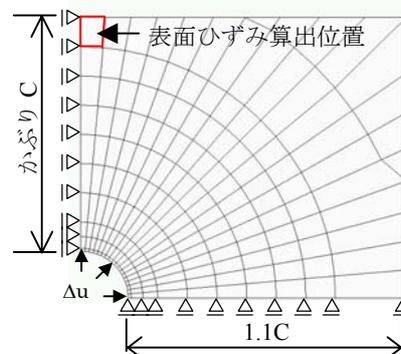


図-5 解析モデル

図-6～図-8に内径膨張 (Δu) - 表面ひずみ関係、内径膨張 (Δu) - 拘束圧関係、腐食量 - 拘束圧関係をそれぞれ示す。ここで、腐食量 m は膨張率 α を2と仮定し、鉄筋密度 ρ ($7870\text{mg}/\text{cm}^3$) として内径膨張 Δu から換算し $m=\rho \cdot u$ とした。また拘束圧は半径方向の反力の合計を周長で割った値とした。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、かぶりが大きいくほど表面にひび割れが到達する時の拘束圧が大きくなり、かぶり 60mm で $9\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の拘束圧が生じる。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、その後低下する。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。また、実験と解析を比較すると、実験での変形・拘束応力状態は解析より求めたRC中の腐食鉄筋の変形・応力状態とは異なるものであることが分かる (図-7～図-8)。

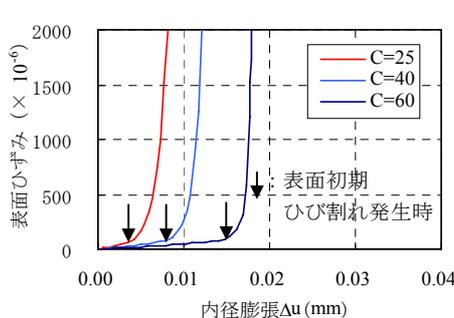


図-6 内径膨張-表面ひずみ関係

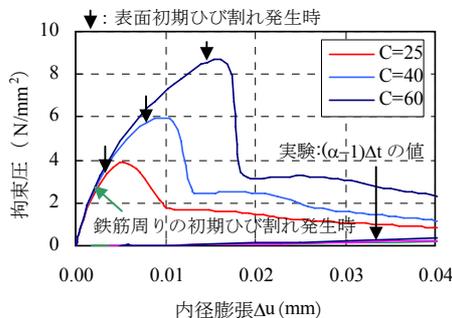


図-7 内径膨張-拘束圧関係

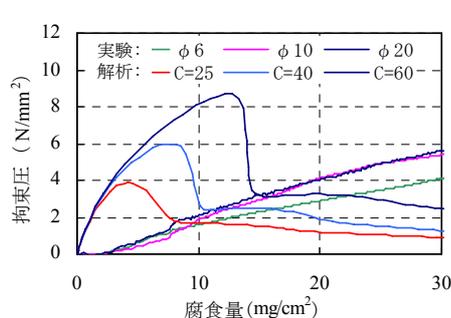


図-8 腐食量-拘束圧関係

4. まとめ

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 実験の結果、腐食量 $10\sim 120\text{mg}/\text{cm}^2$ 、拘束圧 $2\sim 15\text{N}/\text{mm}^2$ において腐食生成物の膨張率 α は $4.5\sim 12$ であった。腐食生成物の膨張率 α は腐食量の進行にともない減少していくが、拘束圧変化の影響をあまり受けないと考えられる。
- (2) 解析の結果、かぶりが大きくなるほど最大拘束圧が大きくなり、かぶり 60mm における最大拘束圧は $9\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であった。また、拘束圧はひび割れが内部で進展する過程においては増加しつづけ、表面に到達後はわずかに増加したのち減少していく結果が得られた。

今後は、本解析より得られた腐食ひび割れ進展過程におけるRC中の腐食鉄筋周りの応力変形状態を想定した腐食膨張実験を行い、腐食ひび割れ発生、その後の劣化したRC部材の構造性能評価手法に反映していく予定である。

参考文献

- 1) 福浦尚之, 市原三馨, 丸屋剛, 小山哲: 鉄筋コンクリート梁部材の鉄筋腐食と構造連成解析に関する一検討, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 5-181, pp.362-363, 2008.9.
- 2) 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