

鉄筋コンクリートの腐食膨張試験のFDEMによる再現解析

(株)大林組 正会員 ○松田 武, 佐藤 伸, 山本修一
 日本原燃(株) 正会員 庭瀬一仁, 工藤 淳
 東電設計(株) 正会員 河原忠弘
 同上 矢込吉則

1. はじめに

平成22年制定の「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」では、廃棄物埋設地の特性に着目して、管理期間終了以後の時間の経過に応じた長期的な状態設定を行うとしている。長期的な状態設定では、人工バリアである鉄筋コンクリートの鋼材の腐食予測は重要な評価項目で、評価には腐食に関する腐食速度や腐食生成物の腐食膨張率などのデータを適切に設定する必要がある。このデータを取得するため、杉橋ら¹⁾は鋼材の腐食膨張を模擬した試験を実施している。

本報告では、この試験結果をもとに有限個別要素法²⁾(FDEM)を用いて腐食膨張解析を実施し、再現性について検証を行った。なお、解析コードはELFEN³⁾を用いた。

2. 既往の腐食膨張試験¹⁾

腐食膨張試験は図-1に示すように油圧式と電食式ともにかぶりと鉄筋径をパラメータとして一辺300mmのコンクリートの立方体で実施している。再現解析はこの試験水準の中で鉄筋径 ϕ 26mm、かぶり100mmを対象とした。

油圧試験は鉄筋の代わりに油圧チューブを設置した。油圧の載荷方法は、初期油圧(0秒時点)1.5MPaとして、以降4時間ピッチで0.15MPaずつ油圧を増加作用させている。

電食試験の供試体についても同様に丸鋼を設置している。電食試験は0.2Aの定電流で通電している。

3. 解析モデル

油圧試験の解析モデルを図-2に示す。油圧試験の解析モデルは3次元4節点要素を用いた。要素分割は油圧チューブ周辺で1要素あたりの辺の長さを4mm程度から遠ざかるに従って境界付近で15mmになるように要素の辺の長さを増大させ、総要素数605,250要素とした。これは要素分割の結果への影響がほとんどない、十分に細かい分割であることを確認している。荷重は自重と開口内面からの圧力である。油圧試験の再現解析に用いたコンクリートの物性値を表-1に示す。引張強度および破壊後の軟化特性は油圧試験結果を用いてキャリブレーションを行い、同定した。

電食試験の解析モデルも油圧試験解析と同様に解析結果に影響がなく、計算負荷の少ない要素分割(205,500要素)とした。電食試験の再現解析に用いたコンクリートの物性値は油圧試験で用いた解析物性値を採用した。鉄筋部の物性値を表-2に示す。

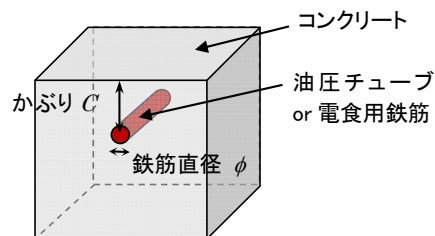


図-1 試験体の概要図

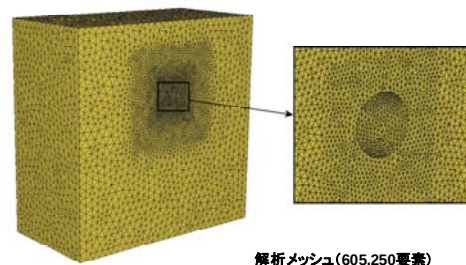


図-2 油圧試験の解析モデル

表-1 油圧試験および電食試験のコンクリート物性値

パラメータ	単位	値
ヤング係数	GPa	38.3
ポアソン比	—	0.2
単位体積重量	kN/m ³	23.0
引張強度	MPa	5.18→6.2
粘着力	MPa	13.6
内部摩擦角	Deg.	36.9
ダイレイタンス角	Deg.	15
破壊エネルギー	N/m	118.8

表-2 電食試験の鉄筋物性値

パラメータ	単位	健全部	腐食部
ヤング係数	GPa	200	100
ポアソン比	—	0.3	0.3
降伏強度	MPa	345	345
単位体積重量	kN/m ³	77.0	77.0

キーワード 有限個別要素法, FDEM, 腐食膨張率, ひび割れ

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組 LLW プロジェクト TEL 03-5769-1141

油圧試験での油圧（載荷圧）と孔半径の関係を図-3 に示す。ひび割れは載荷圧 9.6MPa 時点で発生し、この時の孔半径は 13.000mm から 13.008mm に達した。電食試験におけるひび割れ発生時の腐食深さは 0.01mm（半径で 0.005mm）であることから、電食試験においても鉄筋半径が 13.008mm まで膨張した時にひび割れが発生したと仮定すると、電食試験における鉄筋の腐食膨張率は 2.6 と算定できる。そこで、電食試験シミュレーションの鉄筋腐食膨張率は 2.6 とし、腐食速度は電食試験結果から $0.00785 \mu\text{m/s}$ （14.743day で 0.01mm）とした。

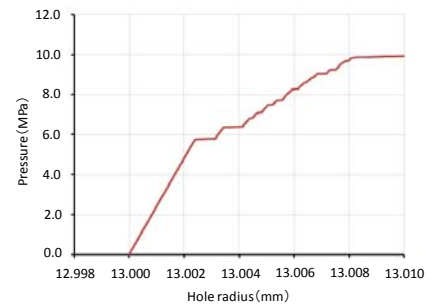


図-3 油圧と孔半径の関係

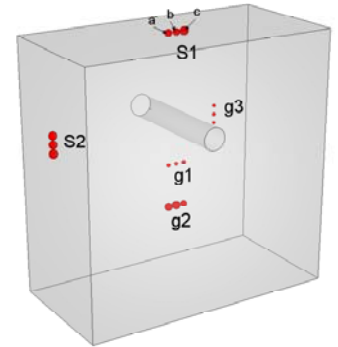
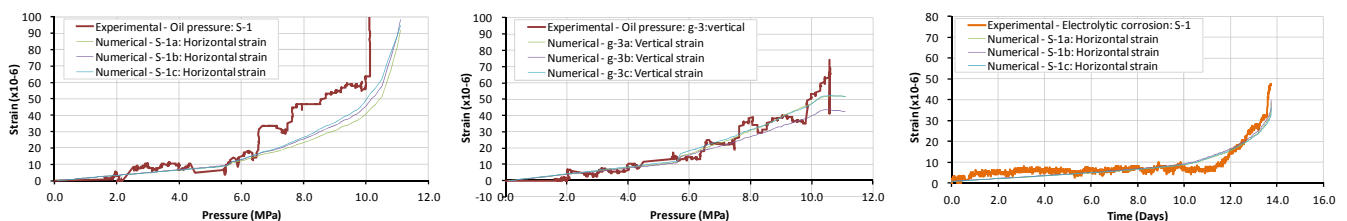


図-4 ひずみゲージ位置

試験結果と対比するため、供試体に設置したひずみゲージの位置（図-4）と同じ位置のひずみ（解析値）を抽出した。

図-4 の試験結果と解析結果の圧力（あるいは時間）に対するひずみの経時変化を図-5 に示す。油圧試験、電食試験ともに解析結果は実験結果に対し、非常に良い再現性が得られた。

次に、試験終了時点での試験結果と解析結果のひび割れ状況を図-6 に示す。油圧試験の解析結果において、大きな幅のひび割れは 3 本入っており両者で一致するが、解析モデル前面におけるひび割れ発生角度が実験と異なる。解析では奥行き方向にひび割れが生じる角度が異なる結果となっており、これは 4 面体要素による奥行き方向のメッシュ分割の影響が現れたものと推定される。電食試験から得られたひび割れは油圧試験に比べ微小なひび割れであるが、解析結果は概ね再現できた。



(a) 油圧 (S1 ゲージ位置)

(b) 油圧 (g3 ゲージ位置)

(c) 電食 (S1 ゲージ位置)

図-5 圧力（時間）とひずみの関係

5. まとめ

既往の腐食膨張試験結果をもとに FDEM を用いた再現解析を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 腐食膨張試験結果の FDEM による再現解析により良好な再現性が得られ、解析手法の妥当性が確認できた。
- (2) 油圧試験の FDEM シミュレーション

結果（ひび割れ発生時の孔径の膨張量）と電食試験結果（ひび割れ発生時の腐食深さ）から、鉄筋の腐食膨張率は 2.6 程度と推測できた。

参考文献

- 1) 杉橋直行ほか：放射性廃棄物処分施設のコンクリート中鉄筋の腐食膨張率に関する研究，土木学会第 67 回年次学術講演会概要集，2012。
- 2) ADAM TOBY BERE : COMPUTATIONAL MODELLING OF LARGE-SCALE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECT TO DYNAMIC LOADING., DOCTORAL THESIS, UNIVERSITY OF WALES, MARCH 2004.
- 3) Rockfield software Ltd : ELFEN 2.8 Specification Overview, 1998.



図-6 ひび割れ状況図 [左：解析結果，右：試験結果]