

鉄筋の腐食膨張を考慮した余裕深度処分施設の長期力学挙動解析

(株)大林組 正会員 山本 修一, ○佐藤 伸, 武内 邦文
 東電設計(株) 正会員 金子 岳夫
 日本原燃(株) 正会員 庭瀬 一仁, 伊藤 裕紀

1. はじめに

余裕深度処分施設の長期力学安定性に影響を及ぼす重要な力学要因として、鉄筋コンクリートピット(以降RCピット)内の鉄筋の腐食膨張が挙げられる。特に、構造設計上ピットの鉄筋を密に配筋する必要がある場合には、その腐食膨張量(総量)が大きくなるためセメント系人工バリアにひび割れが生じ、人工バリアの性能が低下する恐れがある。そこで、本検討では始めに、個々の鉄筋をモデル化でき鉄筋周辺のコンクリートの局所的なひび割れを模擬可能な有限個別要素法(以降FDEM)を用いて、RCピットの部分モデルによる腐食膨張解析を行った。次に、FDEM解析から得られたRCピット部材の膨張変形量に基づき、腐食膨張のモデル化方法を検討し、図-1に示すFEMメッシュを用いて処分施設全体を対象とした長期力学挙動解析を実施した。

2. FDEMによる鉄筋の腐食膨張のモデル化

FDEMは連続体に対する解析手法である有限要素法と不連続体に対する解析手法である個別要素法を結合したもので、連続体であったものが外力等によって破壊し不連続体となる過程やその後の挙動を模擬するのに有用である。本検討では3次元で鉄筋を一本一本モデル化するため、RCピット全体をモデル化して解くことは困難である。そこで、構造的対象性と周期性を考慮し、図-2に示すRCピットの一部を切り出した単純なモデルを用いて鉄筋の腐食膨張解析を行った。ここに、鉄筋は全て150mmピッチでの配筋を仮定した。解析対象期間は5万年とし、鉄筋の腐食速度は0~100年は $1.0\mu\text{m/y}$ 、100~5万年までは $0.01\mu\text{m/y}$ とした(したがってD32鉄筋は無拘束では5万年後に直径で約2.3mm膨張する)。なお、腐食膨張は解析上等価な熱膨張として与えた。コンクリートのヤング係数は48.1GPa、鉄筋のヤング係数は健全部で200GPa、腐食部は健全部の1/2とした。解析コードはELFEN⁹⁾を用いた。

3. FDEM解析結果とFEM解析での腐食膨張のモデル化方法

FDEM解析結果の一例を図-3に示す。X方向変位は主鉄筋位置から外側に向かって大きくなり、定着プレート部付近が最大となることからわかる。この挙動を次の条件①、②を仮定した2次元FEM解析で模擬することを試みた。①平面ひずみを仮定し、XZ面の断面形状と拘束条件はFDEMと同じ、②腐食鉄筋を断面内全体に平均化させた2重要素として表現し、等価な熱膨張を与えることで腐食膨張を模擬(腐食膨張は部材全体に様に発生する)。図-4に両解析結果の変位を比較して示す。FDEM解析の結果は図-3に示す線上の変位の平均値である。FDEM解析結果(X方向最大値=6.08mm, Z方向最大値=4.01mm)はFEM解析(X方向=0.95mm,

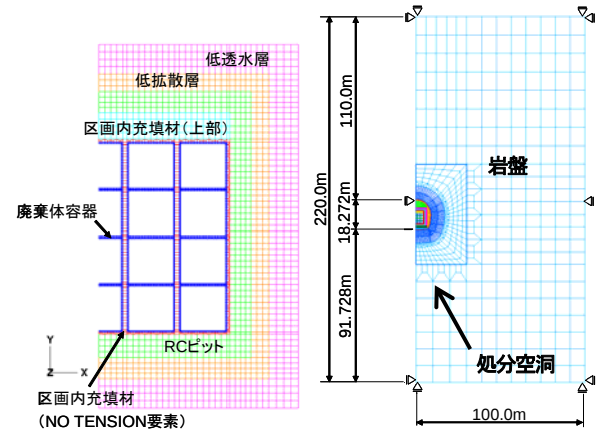


図-1 処分施設の長期力学解析モデル

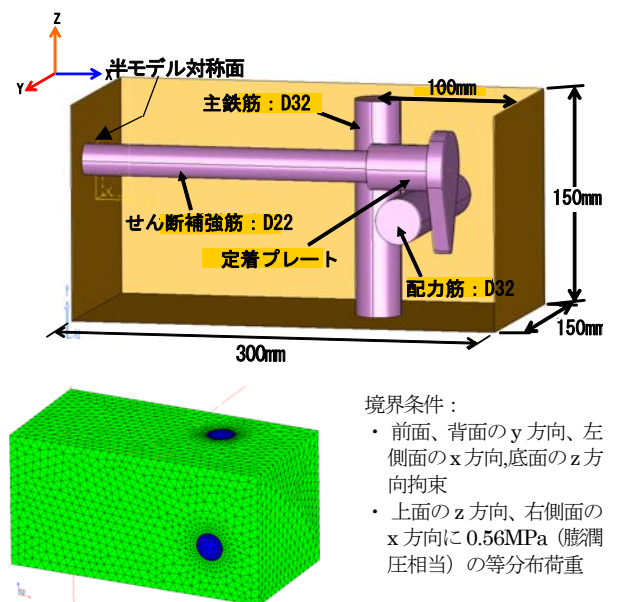


図-2 FDEMによる鉄筋腐食膨張解析モデル(上:モデル化領域と配筋、下:解析メッシュ)

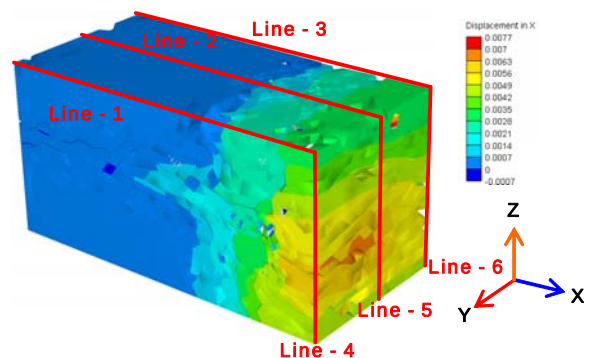


図-3 FDEM解析結果: X方向変位分布図

キーワード 廃棄物処分, コンクリートのひび割れ, 腐食膨張, 有限個別要素法, 余裕深度処分, 長期力学的影響

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組東京本社原子力本部原子力環境技術部 TEL03-5769-1975

Z 方向=0.48mm) の数倍以上の変形量となっており、等方的かつ部材全断面内に平均的に腐食膨張が起こると仮定した FEM 解析は適当ではないことが分かる。そこで、図-1 の処分施設全体を対象とする FEM 解析では、図-4 において FDEM 解析から得られた変位に FEM 解析の変位が同等となるよう、FEM 解析における腐食膨張量に割り増し率を考慮する方法が考えられる。本検討では、保守性を考慮して FDEM から得られたピーク変位と一致する割り増し率 (4.08mm/0.48mm=8.4 倍) を採用した。

4. 処分施設の長期力学挙動解析

処分施設の長期力学挙動解析には汎用非線形有限要素法コード ABAQUS²⁾ を用いて図-1 に示すモデルによる非線形解析を行った。本検討で考慮した力学要因・特性を表-1 に示す。コンクリートの変質については溶脱速度に応じて剛性と強度を岩盤側または低透水層側から逐次 1/10 に低下させることにより表現した。時間軸としては図-6 に示すとおり、岩盤の掘削、支保の設置、岩盤クリープ、人工バリア・廃棄体・埋戻しの設置、ベントナイトの膨潤、セメント系材料の溶脱劣化、廃棄体容器及びピット内の鉄筋の腐食膨張を適切な時期に考慮し、閉鎖後 5 万年までの解析を実施した。

解析結果の一例として図-6 にセメント系人工バリアの閉鎖後 2 万年と 5 万年の変形図を示す。セメント系人工バリア部材は時間を追う毎にΣ型に変形 (膨張) する。これより、低拡散層のひび割れや変形は廃棄体容器の腐食膨張よりも RC ピット鉄筋の腐食膨張の方が支配的な要因であると言える。この時の側部低拡散層の伸び量は 2 万年後に 64.8mm、5 万年後には 127.6mm になる。

ただし、保守性を考慮した本検討における解析条件においても、5 万年後の低拡散層部材の伸び率 (部材長に対する伸び量の率) は 1.2% 以下である。この部材伸び率はひび割れ部面積比と等価と考えることができるので、性能評価に必要な低拡散層のひび割れを考慮した拡散係数 D_u は、例えば次式⁹⁾により算定することができる。

$$D_u = aD_w + (1-a)D_c \quad (1)$$

ここに、 a : ひび割れ部面積比、 D_w : 自由水拡散係数、 D_c : 健全部の拡散係数である。

5. おわりに

鉄筋の腐食膨張量を、鉄筋を個々にモデル化できる FDEM 解析より推定し、その結果を用いて余裕深度処分施設の長期力学挙動解析を実施した。FDEM による RC ピットのモデル化や結果の評価においては保守性が考慮されており、鉄筋の腐食膨張に関してはより現実的なモデル化が今後の検討課題である。

参考文献

- 1) Rockfield software Ltd : ELFEN 2.8 Specification Overview, 1998.
- 2) Dassault Systemes Simulia Corp. : ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.5, 2004.
- 3) 大久保ら : 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, 日本鉱業会誌, Vol.103, pp.293-296, 1987.
- 4) 長沼一洋 : 三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 5) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. : On the Generalized Stress - Strain Behavior of 'Wet' Clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609, 1968.
- 6) 原環センター : 人工バリアの長期性能評価, 原環センタートピックス, 2002.6.NO.6, 2002.

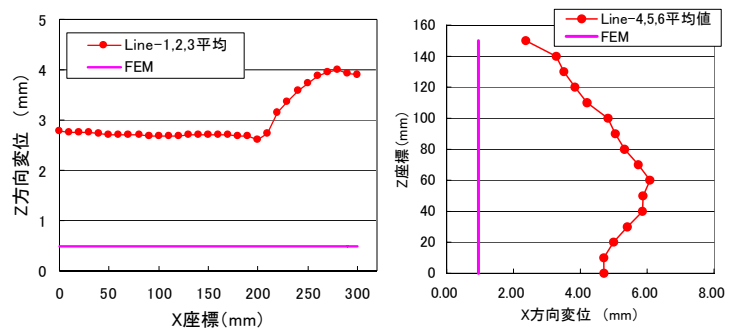


図-4 FDEM と FEM の変位比較

表-1 解析で考慮した力学要因・特性とモデル

特性	使用モデル
岩盤の変形・破壊・クリープ	大久保モデル ³⁾ 、Janach 破壊条件
セメント系材料の変形・破壊	非線形 (引張側は分散ひび割れモデル ⁴⁾ 、圧縮側はひずみ硬化・軟化を考慮)
セメント系材料の劣化	ひずみ軟化 (弾性係数、強度の低減) 溶脱速度(mm/y) : 移流場 $h=0.0021t$ 拡散場 $h=0.21\sqrt{t}$
ベントナイト系材料の変形・破壊	修正 Cam-clay モデル ⁵⁾
膨潤圧	膨潤指数に応じた膨潤、膨潤応力発現
ガス圧	コンクリート系部材には貫通ひび割れ後にガス圧は作用しない、低透水層には膨潤圧に等しいガス圧が作用するとした
廃棄体腐食膨張	腐食速度 0.02μm/y、腐食部の体積は 3 倍に膨張、腐食部の剛性は健全部の 1/2

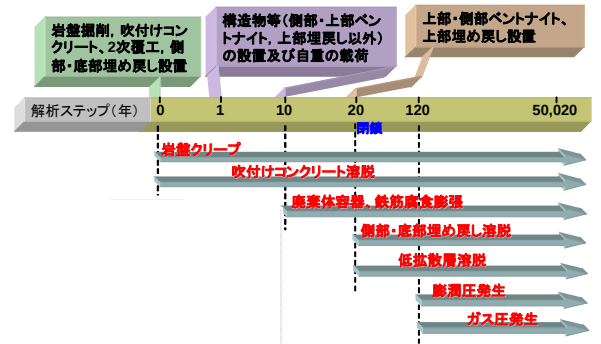


図-5 解析で考慮した各事象と経過年数

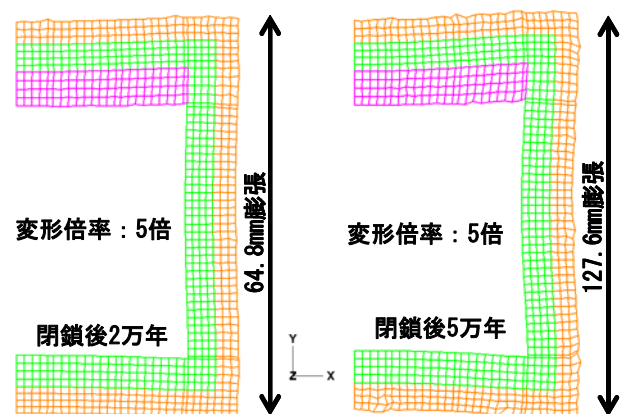


図-6 RC ピット、低拡散層の変形図