高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの 熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析の取り組み

核燃料サイクル開発機構 正会員 〇伊藤彰,杉田裕, 非会員 川上進,油井三和 三菱重工業㈱ 非会員 石原義尚, ハザマ 正会員 千々松正和 コンピュータソフト開発㈱ 非会員 根山敦史, ㈱ダイヤコンサルタント 正会員 菱谷智幸

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構は、国際共同研究 DECOVALEX¹⁾等を通じて、緩衝材中最高温度、緩衝材再冠水時間、 処分坑道および処分孔の掘削から緩衝材再冠水の間の力学的安定性について、現象に立脚した評価を目指し、 熱-水-応力連成モデル/解析コードの開発を進め、その成果を「第2次取りまとめ」の再冠水時の人工バリア 挙動評価に反映した²⁾。「第2次取りまとめ」以降、①オーバーパック腐食や核種移行の重要な環境条件とな る緩衝材/間隙水組成の時間的/空間的変遷の把握が、人工バリア設計評価や性能評価の信頼性向上に不可欠 であること、②海水系地下水環境や軟岩系岩盤におけるコンクリート支保を想定した場合、ニアフィールドの 健全性を長期に渡って評価するためには、人工バリアを中心とした化学的変遷がニアフィールドの水理場や力 学的安定性に与える影響を考慮し、ニアフィールドの全体挙動を定量的に捉えることが肝要であることから、 熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発に着手した³⁾。本報告では、熱-水-応力-化学連成挙動に関す る数値解析の取り組みについて、連成モデル/解析コードの開発、開発コードによる事例解析の内容を示す。

2. 熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発

熱-水-応力連成モデル,物質移行モデル,地球化学モデルの構成方程式,支配方程式を基に,個別現象間の相互作用について整理を行い,熱-水-応力-化学連成モデルを構築した(表1)。本連成モデルは,熱移動,水分移動,応力変形,化学現象(物質移行,地球化学反応)について,温度T,圧力水頭(水分ポテンシャル) ψ ,変位 u_i ,親化学種の総溶解濃度 $C_{<n>}$,親化学種の総濃度 $T_{<n>}$ を未知数とした支配方程式系である。なお,鉱物相の溶解/ 沈殿および水溶性化学種の詳細組成は,地球化学反応の支配方程式群から導出可能となっている。

熱-水-応力-化学連成解析コード開発に際しては,①地 球化学モデル導入に伴う複雑な連成解析に対応可能な解 析体系の構築、②地質環境条件や人工バリア仕様に応じ た連成挙動に柔軟に対応可能な解析体系の構築が肝要と 考え、柔軟な連成解析体系を実現する連成解析コード開 発基盤を活用し、既存コードをベースとした熱-水-応力-化学連成解析コードの開発を進めている。本内容を簡潔 に説明すると、熱-水-応力連成解析コード THAMES,物質 移行解析コード Dtransu, 地球化学解析コード PHREEQE の3つの解析コードを制御するプロセス管理プログラム と, 各解析コード間で連成対象変数の授受を行う共有メ モリ管理プログラムを用いて,熱-水-応力-化学連成解析 を行うものとなっている(図1)。連成解析を実現するた めに必要な手続きは, 各解析コード中の連成解析用コマ ンド記述、連成挙動に係わる物性値の相互依存性等を定 義する物性・連成モジュール作成、連成対象変数を定義 する共有メモリ管理プログラムの入力データ作成、連成 解析のプロセス (シーケンス) を定義するプロセス管理 プログラムの入力データ作成となっており、連成解析コ ード開発の作業効率を大きく向上させるものである。

表1 - 埶-水-応カ-化学連成モデルの支配方程式系
1)熱移動の支配方程式
$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_i C_i q_i T \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_m C_m T \right) = 0$
2)水分移動の支配方程式
$-\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\xi\rho_i D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + (1-\xi)\frac{\rho_i^2 gK}{\mu_i}\frac{\partial(\psi+z)}{\partial x_i} + \rho_i D_T \frac{\partial T}{\partial x_i}\right\} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i nS) = 0$
$\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) - \pi^* \delta_{ij} - \frac{E}{1 - 2\nu} \delta_{ij} \alpha_s (T - T_0) + \chi \delta_{ij} \rho_l g \psi \right\} + \rho_m b_l = 0$
4)化学現象(物質移行,地球化学反応)の支配方程式
4-1)物質移行の支配方程式 (n番目親化学種の質量保存の式)
$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_i q_i C_{(a)} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_i n SD_{ij} \frac{\partial C_{(a)}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_i n ST_{(a)} \right) = 0$
4-2)地球化学反応の支配方程式(平衡モデル)
4-2-1)電気的中性の式
$\sum_{a=1}^{A} (z_a m_a) = 0$
4-2-2)電子保存の式
$\sum_{a=1}^{A} (v_a m_a) = OPV + \sum_{p=1}^{P} (u_p MIN_p)$
4-2-3)質量保存の式 (n番目親化学種の質量保存の式)
$C_{(n)} = \sum_{a=1}^{A} (c_{a,n}m_a), C_{(n)} = T_{(n)} + \sum_{p=1}^{P} (b_{p,n}MIN_p)$
4-2-4)固相の質量作用の式 (p 番目鉱物相の質量作用の式)
$\sum_{n=1}^{N} \left\{ b_{p,n} \log(a_n) \right\} = \log(K_p)$
4-2-5)水溶性化学種の質量作用の式 (親化学種を除くa番目水溶性化学種の質量作用の式)
$\log(a_a) = \log(K_a) + \sum_{n=1}^{N} \{c_{a,n} \log(a_n)\}$

高レベル放射性廃棄物, 地層処分, ニアフィールド, 連成挙動, 連成解析 連絡先(茨城県那珂郡東海村村松 4-33, TEL:029-287-0928, FAX:029-282-9295)



3. ニアフィールド連成挙動の事例解析

開発コードによる解析を例示すべく、ニアフィールド連成挙動の 事例解析を実施した。解析領域はニアフィールドをイメージした 1 次元媒体とし(図2),緩衝材は長さ0.7mでベントナイトケイ砂混 合体(30wt%, 乾燥密度 1.6Mg/m³), 岩盤は長さ 10.0mで硬岩系を想 定した (熱伝導率 2.8W/m/K, 比熱 1.0kJ/kg/K, 固有透過度 1.0× 10⁻¹⁵m²,間隙率 0.005)。初期条件は,緩衝材飽和度 40%,岩盤全水 頭 50m,温度は全域 45℃とし、間隙水組成は純水と構成鉱物の平衡 溶液とした。境界条件は、緩衝材内側を、熱移動について 80℃の規 定境界,水分移動,物質移行について閉境界(流入出なし),岩盤外 側を,熱移動について閉境界(断熱),水分移動,物質移行について 初期値の規定境界としている。なお、本解析では試行として、緩衝 材中で方解石,玉髄,スメクタイト,岩盤中で方解石,玉髄を考慮 し、これら構成鉱物の溶解/沈殿のみを地球化学反応として取り扱 っている。事例解析の結果を図3に示す。1 年後の結果は、緩衝材 内側から岩盤外側に向けた熱伝導、緩衝材への地下水浸潤の段階に あり、Ca 溶液濃度と pH は温度の影響を強く受けて、空間的な変化 を示している。解析に使用した境界条件や岩盤物性により,10年後 の結果は、温度の伝播、緩衝材の飽和を終了した段階にあり、Ca溶 液濃度と pH は温度が均一になったことに伴い, 空間的に一定の値を 示す結果が得られた。今回の事例解析は簡易な境界条件の下で実施 したが、今後は廃棄体の発熱量を考慮した解析や岩盤物性を変えた 解析等に取り組んでいく。

4. おわりに

熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析の取り組みについて, 連成モデル/解析コードの開発,開発コードによる事例解析を実施 した。今後は,地球化学モデル等の拡張に取り組み,仮想地質環境 (「第2次取りまとめ」のモデル地下水等)に対するニアフィールド 連成挙動の事例解析を実施していく。

【参考文献】1)大西有三,杉田裕,伊藤彰,川上進,油井三和,小林晃, 操上広志,千々松正和,雨宮清(2002):人工バリアおよび周辺岩盤に おける連成モデルの開発プロジェクト国際共同研究「DECOVALEX」,土 木学会第57回年次学術講演会講演概要集,CS10-051,pp.483-484.2) 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめー分 冊2地層処分の工学技術,サイクル機構技術資料,JNC TN1400 99-022. 3)核燃料サイクル開発機構(2002):高レベル放射性廃棄物の地層処分技 術に関する研究開発 -平成13年度報告-,サイクル機構技術資料,JNC TN1400 2002-003.

