

機関組技術研究所 正会員 向上 拡美

" " 小林 晃

" " ○弘末 文紀

1. まえがき

近年、低レベルおよび高レベル放射性廃棄物の地層処分が問題となっており、殊にニアフィールドすなわち処分場の近傍における現象の解明とその解析・予測技術が話題となっている。これは、熱・力・水の3つの要因から処分場の安定性、および核種漏洩時の安全性を論じることの意味しており、解析技術の面から見ると、熱移動・浸透・応力の連成問題を解くことである。本課題に関しては、既に大西ら^{1, 2)}が解析理論と解析例について報告しており、厳密解、一部の現象に関する実験結果との比較などを行っているが、熱・力・水のすべての要素を含むいわばフルカップリング現象として求められた実験・実測値との比較は行っていない。これにはそのような実験値もしくは実測値が見当たらないことも関係している。そこで筆者らは、ある根切り掘削工事を例とし、フルカップリング解析の実際問題への適用性について検討を試みた。本文では、その一部を紹介する。

2. 支配方程式および解法

本解析に用いた支配方程式を下記に示す。これらは力学・水力学・熱力学の相互の効果を全て考慮したものである。ここに、E:弾性定数、

$$\left[\frac{1}{2} E_{ijkl} (u_{k,l} + u_{l,k}) - \beta \delta_{ij} (T - T_0) + \chi \delta_{ij} \rho_f g h \right]_{,j} + \rho b_i = 0$$

$$\{ \rho_f k(\theta) h_{,i} \}_{,i} - \rho_f n S_r \rho_f g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_s C(\psi) \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_f n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$(\rho C_v)_{,i} \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_f C_{vr} V_{ri} T_{,i} - K_{T,i} T_{,ii} + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_p} k(\theta) h_{,ii} + \frac{1}{2} (1-n) \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} \cdot (u_{i,i} + u_{j,j}) \delta_{ij} = 0$$

(i, j, k, l = 1, 2, 3)

u:変位, T:温度, χ :Bishopの不飽和パラメータ, ρ :密度, h:全水頭, b:物体力, k:透水係数, θ :体積含水率, n:空隙率, S_r :飽和度, g:重力加速度, β_p :流体の圧縮係数, β_T :流体の熱膨張係数, t:時間, C(ψ):比水分容量, C_v :比熱, K_T :熱伝導係数, $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$, λ, μ :Lameの定数, α :固体の熱膨張係数である。主な仮

定は、地盤は線形弾性体、土中水の流れはDarcy則に従い、熱伝導はFourier則に従う。本解析では地盤内の透水性は、Kelsallらの手法にならった応力依存関係³⁾を考慮しているため同一材料地盤ではその深部になる程小さくなる。また透水係数は粘性の影響を考慮する³⁾。

3. 比較工事例の概要とモデル化

取り挙げた掘削工事は、第三紀泥岩および洪積地盤から成る約30m級の根切り工事で、泥岩およびレキ層中の地下水を排水しつつ掘削中である。本検討は、上述した連成解析手法のフルカップリング状態での解析面における特徴を抽出することが目的であるため、根切り問題に特有の細かい手順(例えば逐次掘削、切梁、土留壁と地盤間のジョイント要素の設定等)は一切省いている。図-1にモデルの分割状況と物性値を示す。本モデルでは、レキ層以浅の層と泥岩以深の層を2分して代表的な物性を与え、土留壁にはコンクリートの物性を与えた。本工事では揚水中の地下水温を測定しており、そのデータから地下100m地点の温度を20℃とした。また地表面の温度として10℃を与えた。解析では、掘削部分の応力解放をその相当分の引張り力として入力し、定常計算を行った。

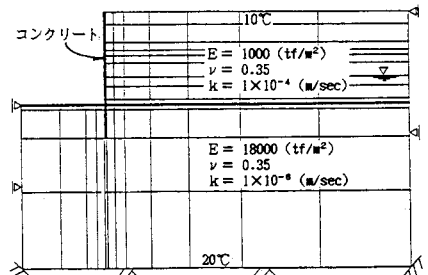


図-1 解析モデルとその物性値

4. 解析結果の一例

図-2は掘削による土留壁と底盤の変形を示したもので、土留壁の最大たわみ量は約40cm、掘削底盤のリバウンド量は約20cmとなる。現在実測されている値は各々約5cmと約2cmであり、解析では切梁を考慮していないうえに定常計算を行っていることからこれらは妥当な値といえるだろう。図-3は地盤内の主応力の大きさとその方向を示している。土留壁前面の掘削底面下で主応力の方向の変化が著しく、最大主応力の方向は鉛直方向よりも水平方向に近くなっている。図-4は地盤内の透水係数の分布を示している。土留壁の裏側とその前面の掘削底面下では、各々たわみとリバウンドによる間隙の増加が生じるため共に透水係数が大きくなっている。また土留壁裏側下部で透水係数が小さくなっているのは、せん断変形によりその部分の間隙が減少したためであろう。図-5は地下浸透流の流速ベクトルを示しており、土留壁をまわりこむ流れが見られる。図-6は地盤内の温度分布を示している。温度分布は地下水の影響が大きく、その流れに沿って変化している。

5. 考察およびまとめ

地下水の挙動では、地盤の変形によりその透水性が変化する影響を大きく受けた。温度については、本解析ではその値が小さいため他の要因に大きな影響こそ与えなかったが、地下水の粘性や地盤の熱膨張に反映されていた。また温度分布は地下水の流れに大きく影響されることがわかった。以上のように本解析理論は、熱・力・水のフルカップリングを考慮した有用な理論であるといえよう。

本解析に用いた要素は、変位に関しては8節点4角形、水圧と温度に関しては4節点4角形である。本解析コードをスーパーミニコンPRIME9750を用い、10要素1次元モデルと120要素モデル(本解析例)に適用した場合のCPU-Timeは、各々約90秒と約5900秒であった。また本解析例と同様のモデル(3角形347要素)に、飽和-不飽和浸透流解析コード(UNSAT)を用いるとそのCPU-Timeは約90秒であった。

(参考文献) 1) Yuzo Ohnishi, Hiroaki Shibata and Akira Kobayashi: Development of Finite Element Code for The Analysis of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Behaviors of Saturated-Unsaturated Medium, International Symposium on Coupled Process Affecting The Performance of A Nuclear waste Repository, 1985.9 2) 大西 有三、柴田 裕章、小林 晃: 有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析手法、土木学会論文報告集(投稿中)、1986 3) 小林 晃、大西 有三: 岩盤の応力-浸透-熱移動連成挙動における材料物性の非線形性の影響について、土木学会論文報告集(投稿中)、1986

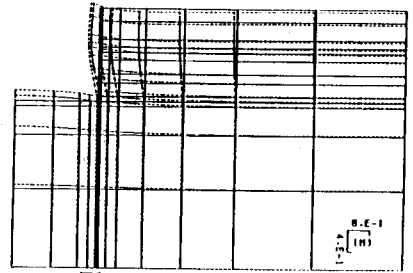


図-2 地盤の変形図

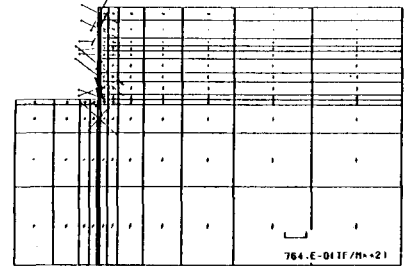


図-3 主応力図

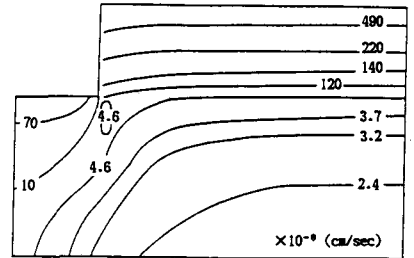


図-4 透水係数分布図

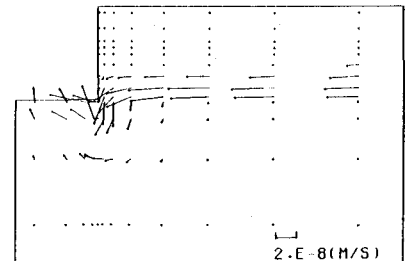


図-5 地下水流速ベクトル図

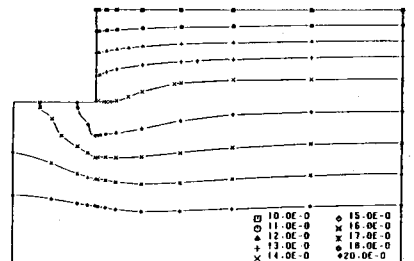


図-6 温度分布図