

対流を考慮した熱・応力・浸透の連成問題について

名古屋大学大学院 学生会員 ○ 清木隆文
 名古屋大学大学院 都築 敦
 名古屋大学工学部 正会員 市川康明

1. はじめに 最近、地下空間の特長である隔離性、耐震性、恒温性を生かした土木構造物の建設が目立っている。その例として、エネルギーの地下備蓄や放射性廃棄物の地下処分などが挙げられる。これらは人間の生活空間からの隔離が必要である。そのために、これらの構造物はできるだけ健全な岩盤を選んで計画されている。この岩盤自体の長期変動（隆起、風化 etc.）は、過去の変動を地質学的に調査することによって予測できる。これに対して地下水が周辺環境に及ぼす影響の予測は、非常に困難である。実際、ほとんどの地盤中に地下水は存在するので、その長期的な移動を予測すると、確率的に地下水が地盤中の構造物に与える影響は無視できないことがわかる[2]。そこで、比較的短期間でその影響を観察するために、多孔質の軟岩を対象にしてモデル実験を行ない、その実験結果に対応させて対流を考慮した連成解析を行なうことを試みる。今回の報告では、その実験と解析に至る経緯ならびにこれからの展望について述べる。

2. 混合体理論に対流を考慮する必要性 まず問題の単純化のために、空隙が水で完全に飽和された地盤を考える。そして、地盤は固相（地盤の骨格）と液相（空隙中の水、地下水 etc.）の二相から構成されている混合体であると仮定して、混合体理論を適用する。まず、数値解析を行なった結果から、今回のように熱の移動に対して対流を考慮する必要性を説明する。解析を行った目的は、定常浸透流がある地盤中に熱源を置く条件下で、地盤内の水の移動による熱伝導場の乱れについて調べることであった。各相の密度は場所による急激な変化はないという条件下で、地盤中の熱移動が熱伝導単独に依存する場合と、熱伝導と移流（水の移動によって熱が広がる流れ）の両方に依存する場合の二通りを考えた。まず初めに、浸透流のある地盤中で、移流が熱伝導に比べて卓越する熱移動を発生させるために、透水係数を変化させて解析を行なった。さらに、浸透流のない場合についても解析を行なった。その結果、浸透流のある透水性の高い地盤では、移流が熱移動に与える影響が熱伝導よりも卓越することがわかった[1]。

実際問題として、構造物はより健全な岩盤に作られるので、移流が熱の移動に及ぼす影響は、地盤の透水性が低いために、無視できるほど小さいと考えられる。これを受けて、健全な岩盤中の地下水は、その場に淀んでいると推測される。この条件のもとで、対流は人工熱源から周辺環境への熱の広がりを促すことが十分考えられる。さらに、その熱源が長期的な熱を地盤に与える場合、対流による周辺環境への影響はより大きくなると考えられる。以上の理由から実際の地盤を睨んで、対流が周辺環境に及ぼす影響を調べることを試みる。

3. 対流を考慮した支配方程式について 対流を起こす仕掛けとして、液相の密度が間隙水圧と温度に依存すると仮定した Fernandez の式[3]を級数展開して一次近似した式

$$\rho_w = \rho_w^0 \left\{ 1 - \beta_w (T - T_0) + \frac{1}{K_w} (p - p_0) \right\} \quad (1)$$

を各支配方程式に代入する。その結果得られる浸透式、静的な力のつり合い式、エネルギー輸送式を以下に示す。

$$\left(\text{浸透式} \right) \frac{1-n}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{n}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v}_s + \frac{n}{\rho_w} \nabla \rho_w \cdot \mathbf{v}_w - \nabla \cdot \left\{ k \nabla \left(\frac{p}{\rho_w g} + z \right) \right\} = 0 \quad (2)$$

(静的な力のつり合い式)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + (1-n)b_s + nb_w = 0, \quad b_w = \rho_w^0 g L \left\{ 1 - \beta_w (T - T_0) + \frac{1}{K_w} (p - p_0) \right\} \quad (3)$$

(エネルギー輸送式)

$$\left\{ (1-n)\rho_s C_s + n\rho_w C_w \right\} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_w C_w k \nabla \left(\frac{p}{\rho_w g} + z \right) \cdot \nabla T - \nabla \cdot \{ \lambda \nabla T \} = 0 \quad (4)$$

ここで n は間隙率、 ρ_s 、 ρ_w は固相と液相の密度、 C_s 、 C_w は各相の比熱、 $\mathbf{v}_s$ 、 $\mathbf{v}_w$ は各相の移動速度、 β_w 、 K_w はそれぞれ液相の熱膨張係数、体積弾性係数、 k は透水テンソル、 g は重力加速度成分、 p は静水圧成分、 T は温度、 z は自由水面の基準面からの高さ、 λ は平均熱伝導率テンソル、 $b_s (= \rho_s g L)$ 、 $b_w (= \rho_w g L)$ は各相の体積力 (ただし、 $L^T = [0 \ 0 \ 1]$) である。これらの式の中でまず第(2)式 (浸透式) の第4項は水の移動に伴って水の密度変化が伝播することを表現している。そして、第(3)式の第3項は初期定常状態の密度を基準にして、浮力を含めた現在の見かけの体積力を表している。この項は対流の原動力となる水粒子の浮力を陽に表している。以上のように(1)式を各支配方程式に代入することによって水の密度変化による対流を現す項が各式中に顕著に現われてくることがわかる。

4. 連成実験について 人工熱源が地盤内にある状態を想定して、モデル実験を熱・応力・浸透の連成問題を対象として試みる。供試体は多孔質岩として船入石 (凝灰岩) を用いる。ここで実験装置の概略図を図-1に示す。この実験装置を用いて熱・応力・浸透の連成実験を行って、それぞれの因子が複合的に仮想地盤に対して及ぼす影響を測定する。この実験の負荷は、熱、載荷重、浸透圧である。測定要素は供試体上面の (沈下) 変位、供試体側面のひずみと主ひずみ方向、供試体側面の温度、浸透量、浸透圧、流跡である。流跡を除いて、これらの測定要素は、パーソナルコンピュータを用いて自動計測する。

5. 今後の展望 まず、先に挙げた支配方程式を有限要素法のプログラムに組込む。そして、対流を考慮した連成解析を行なう。これによって、浸透流の流速が比較的小さい場合の熱移動を予測できると思われる。また連成のモデル実験から、熱・応力・浸透の連成によって実際に起こる現象を知ることができると考えられる。

さらにこの実験供試体を有限要素モデル化して、対流を考慮した連成解析を行なうことを試みる。この結果から熱・応力・浸透連成場に対する混合体理論の適用が有用であるかどうかを確認できると期待される。

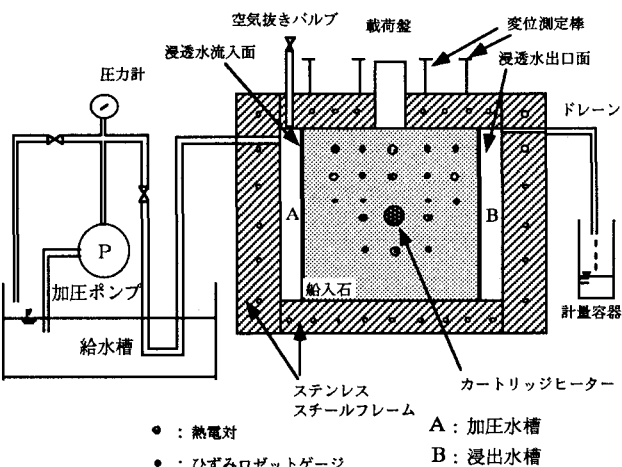


図-1 実験装置概略図

6. 参考文献 [1] 高田渉太郎, 混合体理論による地盤内の熱・水・応力連成挙動に関する基礎的研究, 名古屋大学修士論文, 1992, [2] 小出仁, 高レベル放射性廃棄物地層処分, 資源・素材学会誌, vol.106 pp. 495-499, 1990, [3] R. W. Lewis & B. A. Schreffler, The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, WILEY, 1987