

(10) 岩盤内における間隙水および熱の移動を考慮した変形解析手法について

大成建設(株) ○ 里 優 通利 勝美

1. はじめに

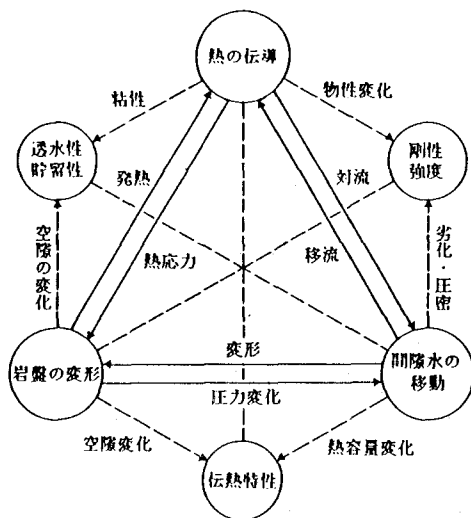
これまで、岩盤内に掘削された大規模地下空洞の安定性は、主に力学的な面から検討が加えられてきた。しかしながら、地下原子力発電所や廃棄物処分場など、将来において計画されている岩盤内空洞については、単に力学的な安定性のみならず、地下水や熱の変動に起因する影響についても、充分な精度の検討を実施することが求められている。このため、設計においても、これらの項目を考慮した実験や数値シミュレーションを実施し、掘削空洞周囲に生ずる様々な物理現象を把握しておく必要がある。本研究は、このような観点から、岩盤の力学的挙動に及ぼす熱、及び水の移動の影響について考察を加えるとともに、予測手段としての数値解析手法を開発することを目的としている。

2. 相互作用について

岩盤の変形、水の移動及び熱の伝導は、それぞれが独立に生ずるのではなく、お互いに影響を及ぼし合っていると考えられる。これらの相互作用を正しく評価することは容易ではないが、相互作用に比較的大きな影響を及ぼすと考えられる因子にのみ着目すれば、図-1のように表わすことができる。以下、各相ごとの相互作用について検討する。

2. 1 岩盤の変形と間隙水の移動

岩盤は多くの場合、内部の間隙(粒子間、クラック等)に水分を含有しており、間隙とおしが連続している場合、間隙水の圧力差により水の移動が生ずる。このとき岩盤は、大なり小なり、この質量の変化を受けて変形すると考えられる。このような変化は、水の運動がダルシー則に従うものと仮定した上で、次のように記述することができる。



$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi \right) = \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_a + \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial t} \phi \quad (1)$$

K: 透水係数 ϕ : 間隙水圧 m: 貯留係数 ϵ_a : 体積ひずみ

(1)式の左辺は質量の変化を表わし、また、右辺第一項は、この質料の変化の一部を補うに岩盤の変形、第二項は、水自身の変形や飽和度の変化など岩盤の変形に影響を及ぼすに補われに質量をそれぞれ表わしている。このとき岩盤に発生する応力は、 ϵ_a を内部のひずみ変化とみなして、(2)式のように表わすことができる。 α_1 は、間隙比などから成る係数である。岩盤の応力が変化した場合、これとつり合って間隙水圧も変化する。いまだに水の移動を許さず、岩盤に圧縮力を用いさせにすると、間隙の閉塞によって間隙水圧は増加する。従って、岩盤内の応力と間隙水圧の間には、(3)式のような関係が成り立つ。 α_2 は、間隙の形状や岩盤の剛性等に依存する係数である。

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\epsilon_{kl} - s_{kl} \alpha_1 \frac{\epsilon_a}{3}) \quad (2)$$

$$\phi = \alpha_2 \frac{\sigma_{ii}}{3} \quad (3)$$

σ : 岩盤の応力 C: 岩盤の変形係数 α_1, α_2 : 係数

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} + X_i = 0 \quad (4)$$

岩盤の變形と水の移動との相互作用は、(1)~(3)式、及び、(4)式で表わされる岩盤の平衡方程式を解くことにより評価することができる。

2. 2 熱の移動と岩盤の變形

熱の移動と岩盤の變形との相互作用は、次のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} T \right) = C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - T \beta_{ij} \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_{ij} \quad (5) \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} - \beta_{ij} T \quad (6)$$

T : 岩盤の温度 λ : 熱伝導係数 C_p : 熱容量 β : 熱膨張に関する係数

(5)式はエネルギー保存則より得られる熱伝導方程式であり、(6)式は熱膨張を考慮した弾性体の構成方程式である。

2. 3 熱の移動と水の移動

水の移動が生じている場では、水の流れによって熱量が運ばれる。従って、(5)式は、次のように改められる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} T \right) + \alpha_3 C_p \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi \right) = C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - T \beta_{ij} \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_{ij} \quad (7)$$

左辺第二項は、移流項と呼ばれるものであり、 α_3 は、移流が岩盤の熱伝導に及ぼす影響を表わす定数である。

他方、水は熱せられることにより密度が変化し、流れが生ずる(自然対流)。この効果は、次式で表わすことができる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi + K_{is} \beta' (T - T_0) \right\} = \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_a + \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial t} \phi \quad (8)$$

T_0 : 基準温度 β' : 温度変化に伴う水の密度変化を与える係数

左辺第二項は、浮力により生じた水の流速を示している。なお、(8)式では、熱膨張による間隙水圧変化は考慮していない。

以上の(1)~(4)、(6)~(8)式を連立させて解くことにより、各相の相互作用を評価することができる。

3. 数値解析手法

このように、幾相もの相互作用を、有限要素法等の離散化手法を用いて解く場合、次のような問題が生ずる。

i) 相互作用に関する一連の方程式を、マトリックスとして解こうとした場合、これが非対称となり、

演算に要する時間が膨大化するものとなる。

ii) 温度、間隙水圧、応力を定義する位置が、要素内で同じでなければならぬ。

これらを解決するために、詳細にわたる数学的考察が必要であるが、ここでは次のような手法を用い解析を試みる。まず、i)は、時間に関する積分を陰(implicit)な形式化により行うおうとする場合に生ずるものであるが、本手法では、前進差分法を用い陽(explicit)な形式化で時間積分を行うこととする。これにより、温度、間隙水圧は常に既知として取り扱わうことができ、従って、連立方程式を解く操作は、変形についてのみ行えばよくなる。本手法は、要素分割と時間分割の大きさが調和的でない場合、解が発散する可能性があるものの、小さな時間間隔を採用することにより、充分実用的な精度で解を得ることができる。

究むべき要素を用いた場合、応力(ひずみ)は要素重心値として求まるが、温度応力や間隙水圧を計算する上で、温度、間隙水圧も同じ位置で求まれば都合である。これには、次のような手法を用いる。すなわち、要素重心で定義され、温度、間隙水圧時のポテンシャル量とし、 v を流速ベクトルとすると、これらには、(9)式のよう関係がある。(9)式について、要素の形状関数 N を重みとし、重みつき残差法を適用すると(10)式となる。さらに部分積分して(11)式が得られる。

$$\lambda_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \psi - v_i = 0 \quad (9) \quad \int_V N \lambda_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \psi dV - \int_V N v_i dV = 0 \quad (10)$$

$$\int_S N \lambda_{ij} \psi n_j dS - \int_V \lambda_{ij} \frac{\partial N}{\partial x_j} \psi dV - \int_V N v_i dV = 0 \quad (11)$$

(11)式に於いて、左辺第一項は、表面に於けるポテンシャル量と等価な流れ、第二項は、要素重心のポテンシャル量と等価な流れをそれぞれ表わし、第三項は、これとつり合う節点の流れを表わしている。従って、 u は既知とし、(11)式を解くことにより節点に於ける流速 u を求めることができる。さらに次式については、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i - \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial Na}{\partial x_i} u_i - \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

となり、要素重心の時間に関するポテンシャル量の变化を得ることができる。物理的には、(10)式は要素重心間のポテンシャル勾配を要素面積の重みをつけ、節点で平均化することを意味し、また(13)式は、要素構成節点の流速の平均勾配を求めることを意味している。この手法は、節点上でポテンシャル量を定義する有限要素法を用いた場合に比べ精度が低く、要素形状が不規則な場合に解が不安定な場合がある。従って、このため、節点値についてはその節点を囲む節点の平均値を、また要素重心値についてはその要素を囲む要素の平均値を用いる方法を取り解の安定を図っているが、より精度を高めるためには、高次の内挿関数を持つ要素を用い、有限要素法により定式化すべきであろう。

4. 解析例

解析手法の妥当性を検証するため、熱伝導に関する方程式の場合を例にとり、一次元問題で解析を試みる。支配方程式、理論解、用いた物性値は次のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

$$\frac{T}{T_0}(x, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{x - Ut}{\sqrt{4Dt}} \right] + \exp \left(\frac{UX}{\lambda} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{x + Ut}{\sqrt{4Dt}} \right] \right\} \quad (15)$$

$$D = \lambda / Cp\delta = 0.0025 \text{ (m/hr)}$$

図-1は要素分割、図-2, 図-3は、それぞれ水の流速 u を0.002及び0(m/hr)とした場合の解である。解析解と理論解は、よく一致している。図-3には、弾性体と水の移動を連成させた場合も併せて示してある。連成効果がない場合、即ち水の移動による質量の変化の影響を弾性体を受けない場合には、支配方程式(14)式において $U=0$ とした場合と同じものとなり、 $D(=K/m)$ が跨しければ、解は熱伝導の場合と同様である。しかし、質量の変化を弾性体が全て受けもつた場合には(図中破線)、応力状態が(従って間隙水圧も)変化し、前記の場合とは、かなり異なった間隙水圧分布となる。図中、間隙水圧がかなり低くなる部分があるが、ここは、左側の要素が水の流入により膨張するため、これに引かれて、引張応力が生じている部分である。図-4に、水と弾性体の連成を考慮した場合の変位分布を示す。

次に、移流と対流の効果を見るために行なった解析例を示す。支配方程式は、(7)、(8)式であり、式中の弾性体のひずみに関する項は無視する。間隙水については、四辺全てを不透水境界とし、熱については上下を断熱、右辺を基準温度(0°C)で固定するものとした。解析は、左辺を10°Cまで熱したときのものである。なお、(8)式における、 β は0.1とし、対流の効果を増強してある。解析結果からは、水の

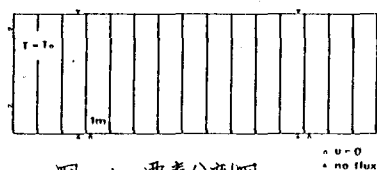


図-1 要素分割図

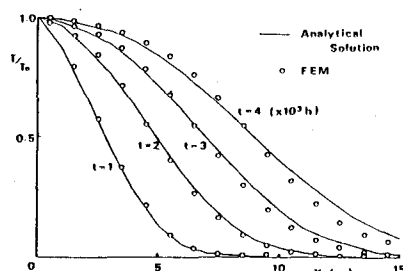


図-2 移流拡散問題の解

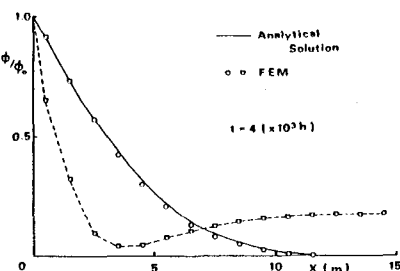


図-3 拡散問題の解

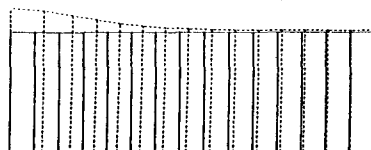


図-4 変位分布

移動と熱の伝導がそれぞれ影響を及ぼし合っている様子がわかる。

(図-5~図-8)。

三相の相互作用を全て考慮した例を図-9, 図-10に示す。この例ではトンネル下方に発熱体があり、岩盤が膨張しようとするため、間隙水圧は、この影響を受け、発熱体近傍で高くなっている。なお、図-10では、発熱体がない場合の解も併せて示した。

5. まとめ

本報告では、岩盤の変形と熱、水の移動との相互作用を次のように考え、数値解析を試みた。

- i) 岩盤の変形は、水の移動と熱膨張によるひずみの変化を受ける。
- ii) 間隙水圧は、岩盤の変形、及び温度の影響を受ける。
- iii) 温度は、水の速度、及び岩盤の変形の影響を受ける。

解析結果からは、ここで仮定した相互作用の効果を明瞭に見ていることができた。しかしながら、相互作用を表現するために用いた変配方程式や、幾つかの仮定、パラメータ等に対する吟味は、未だ不十分であり、今後、実験を重ね、検証していく予定である。また、数値解析手法についても、実用的で済むにせよ、精度の面で幾分難があり、より高い精度や安定性が得られるよう改良してゆく予定である。

(参考文献)

(1) V. Guvanasen et. al.
"Numerical Solution for
Solute Transport in
Unconfined Aquifers."
Int. J. Num. Meth. in
Fluids, 1983. vol 3.

(2) J. K. Lee et. al.
"Finite Element
Evaluation of Thermo-
elastic Consolidation"
23 symposium on
Rock Mechanics.
1982.

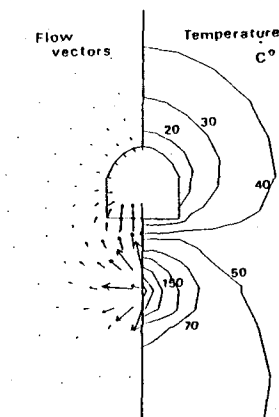


図-9 温度、熱流束分布

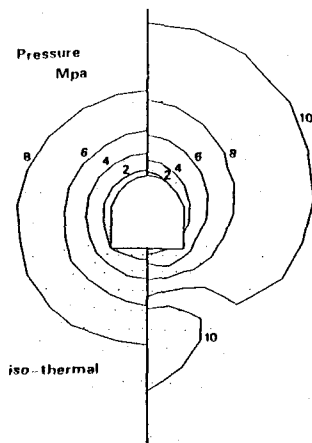


図-10 間隙水圧分布

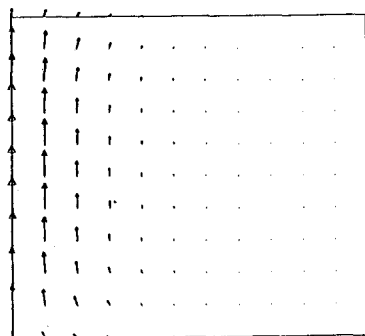


図-5 流速ベクトル ($t=10^3$ hr)

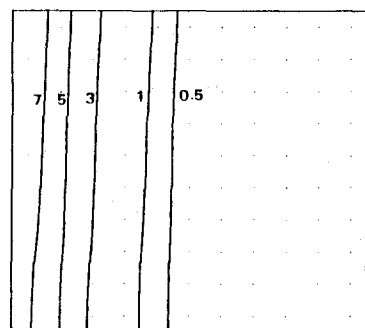


図-6 温度分布 ($t=10^3$ hr)

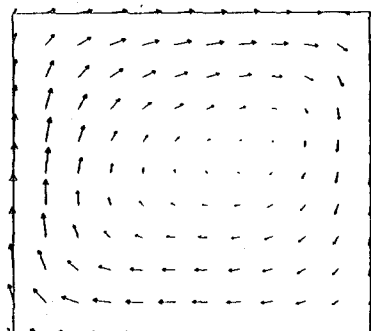


図-7 流速ベクトル ($t=10^4$ hr)

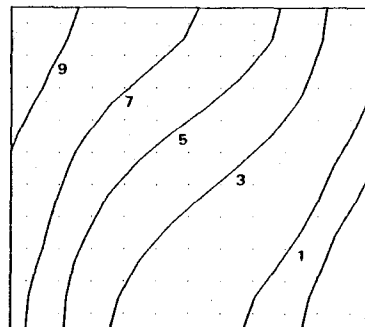


図-8 温度分布 ($t=10^4$ hr)

(10) A Deformation Analysis

Considering Water Flow and Heat Transport in Rock Mass

M. Sato , K. Kamemura Taisei Corp.

Summary

Rock deformation, groundwater flow and heat transfer through a rock mass are not independent phenomena.

In this paper, the interaction of these are treated as follows.

- i) Rock deformation is affected by a loss of mass due to water flow and by a thermal expansion.
- ii) Water flow is affected by rock deformation and thermal gradients.
- iii) Heat transfer is influenced by water flow rate and heat due to rock deformation

A convective-dispersion and three phase problem are solved by means of Finite Element Method partly adopting Finite Difference technique, and explicit time integration scheme.

Satisfactory results are obtained from these simulation and it is shown that the method and physical modelling presented here are appropriate.