

鹿島建設(株)	正会員	○ 陳 昭宏
東海大学海洋学部	正会員	Ömer Aydan
名古屋大学工学部	正会員	市川康明
同 上	正会員	川本眺万

1. はじめに 近年、放射性廃棄物の地下廃棄、石油地下備蓄、電力貯蔵など、各方面で土木構造物として地下を利用という動きが活発になってきており、今後も積極的に計画されるであろうと予想される。これにもなって地盤の利用は、その特殊性のゆえに地盤の水理、力学特性に対するこれまで以上の詳細な検討と正確な予測が要求される。本研究では、まず地盤内における水と応力、および熱の連成挙動に対して、混合体理論の立場から応力、浸透と熱も加味した3者の連成場での支配方程式を導入する。つぎに、それに基づいた有限要素法を用いて、地盤内の変位、間隙水圧、温度の連成挙動に関して数値解析を行った。

2. 連成(coupling)の概要 混合体中では、応力、浸透、熱それぞれが互いに影響し合っている。その様子を Fig 1 に示す。混合体理論によるとそれぞれの場における支配方程式は以下のようになる。つりあい方程式(運動量保存則)は、

$$\nabla \cdot [D(d\varepsilon - d\varepsilon_p - d\varepsilon_T - d\varepsilon_0) - mdp] + db = 0 \quad (1)$$

となる。ただし、 $d\varepsilon$ は骨格系の全ひずみ、 $d\varepsilon_p$ は間隙水圧によるひずみ、 $d\varepsilon_T$ は温度の変化で生じたひずみである。

浸透方程式(質量保存則)は

$$-\nabla^T \left\{ S_w \rho_w \frac{k}{\mu} \nabla(p_w + \rho_w gh) \right\} + \rho_w \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + S_w \rho_w \left\{ (m^T - \frac{m^T D}{3K_s}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \left[ \frac{1-\phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_w} - \frac{1}{(3K_s)^2} m^T D m \right] \frac{\partial p}{\partial t} \right. \\ \left. + [-\phi \beta_w - (1-\phi)\beta_s + \frac{1}{3K_s} m^T D m \frac{\beta_s}{3}] \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = 0 \quad (2)$$

となる。ここに、 $S_w$ 、 $\rho_w$ 、 $p_w$ 、 $K_w$ は水の飽和度、密度、圧力と体積弾性係数、 $k$ は浸透係数、 $K_s$ は固相の体積弾性係数、 $\phi$ は間隙率、 $\beta_w$ 、 $\beta_s$ は液相と固相の温度膨張係数である。

また、エネルギー方程式(エネルギー保存則)は、

$$(1-\phi)C_s T \left( \frac{\rho_s}{K_s} \frac{\partial p}{\partial t} - \rho_s \beta_s \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \phi C_w T \left( \frac{\rho_w}{K_w} \frac{\partial p}{\partial t} - \rho_w \beta_w \frac{\partial T}{\partial t} \right) + [(1-\phi)\rho_s C_s + \phi \rho_w C_w] \frac{\partial T}{\partial t} - \\ \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_w C_w (\nabla T) \cdot v = 0 \quad (3)$$

となる。ここに、 $C_w$ 、 $C_s$ は液相と固相の比熱である。

3. 数値解析 前節で導いた支配方程式を弱形式化すると以下のようになる。

(釣合い方程式の弱形式)

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T \dot{\varepsilon} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T m \dot{p} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D m \dot{p} \frac{1}{3K_s} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D m \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D \dot{\varepsilon}_0 d\Omega - \dot{f} = 0 \quad (4)$$

(浸透方程式の弱形式)

$$\int_{\Omega} \{ \nabla \delta \bar{p} \cdot \frac{k}{\mu} \nabla(p + \rho gh) + \delta \bar{p} [ (m^T - \frac{m^T D}{3K_s}) \dot{\varepsilon} + (\frac{1-\phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_w} - \frac{1}{(3K_s)^2} m^T D m) \dot{p} + (-\phi \beta_w - (1-\phi)\beta_s \\ + \frac{1}{3K_s} m^T D m \frac{\beta_s}{3}) \dot{T} ] \} d\Omega - \int_{\Gamma_t} \delta \bar{p} q d\Gamma = 0 \quad (5)$$

(エネルギー方程式の弱形式)

$$\int_{\Omega} [ \nabla \delta \bar{T} \cdot (\lambda \nabla T - \rho_w C_w \nabla T) + \delta \bar{T} \{ (1-\phi) \frac{C_s \rho_s}{K_s} T + \phi \frac{C_w \rho_w}{K_w} T \} \dot{p} + \{ (1-\phi)\rho_s C_s + \phi \rho_w C_w \\ - (1-\phi)\rho_s C_s \beta_s T - \phi \rho_w C_w \beta_w T \} \dot{T} ] d\Omega + \int_{\Gamma} \delta \bar{T} q_h d\Gamma = 0 \quad (6)$$

これらに Galerkin 有限要素近似を導入し、変位 $u$ 、ひずみ $\varepsilon$ 、間隙水圧 $p$ と温度 $T$ を次式のように離散化する。

$$u = N\bar{u}, \quad \varepsilon = B\bar{u}, \quad p = N\bar{p}, \quad T = N\bar{T} \quad (7)$$

ここで、 $N$ は形状関数、 $B$ は要素ひずみ節点変位ベクトルである。仮想変位 $\delta u$ 、仮想ポテンシャル $\delta \bar{p}$ 、仮想温度 $\delta \bar{T}$ にも同じ近似を導入すると、弱形式の離散近似式がそれぞれ次式のように得られる。

$$K\dot{u} + L\dot{\bar{p}} + T^{(U)}\dot{\bar{T}} = \dot{f} \quad L^{(T)}\dot{u} + H\dot{\bar{p}} + S\dot{\bar{T}} + T^{(P)}\dot{\bar{T}} = \dot{f} \quad T^{(L)}\dot{\bar{p}} + T^{(R)}\dot{\bar{T}} + T^{(S)}\dot{\bar{T}} = T^{(G)} \quad (8)$$

これらに、時間差分化( $\theta$ -法)を用いると、各時間ステップごとの節点変位 $\bar{u}$ 、間隙水圧 $\bar{p}$ と温度 $\bar{T}$ が逐次求められる。

**4. 解析例** まず用いたモデルの有限要素分割図および境界条件、初期条件を Fig.2 に示す。境界条件は、上面で $50^\circ\text{C}$ で透水( $p = 0$ )とし、側面の $x$ 方向と底面では固定・不透水とする。荷重は、上面に $1\text{t}/\text{m}^2$ を10000日間作用させる。土質定数は Table 1、各時間ステップは Table 2 に示す。初期温度は $20^\circ\text{C}$ を与えた。この解析結果において、指定された各節点の時間経過にともなう温度変化を Fig.3 に示す。この図より、地盤内温度の変化が非常に遅いことが判る。したがって、Fig.4 の変位図で時間ステップ後半に見られる膨張現象は、この緩慢な温度変化による影響であると考えられる。Fig.5 に示す時間経過にともなう間隙水圧の変化から圧密現象が説明される。Fig.6 から Fig.8 まではそれぞれ地盤全体の各時間ステップに対する変位状態、過剰間隙水圧分布、温度分布を表している。これらの図から地盤は、荷重と熱を同時に作用させた直後の状態が最も不安定であることが判る。

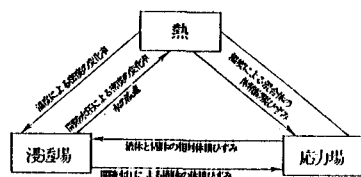


Fig.1 Interaction mechanisms in a fully-coupled system

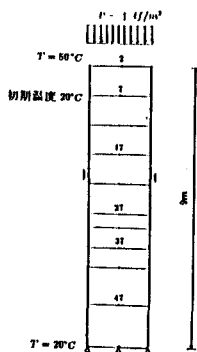


Fig.2 Model problem and finite element mesh

Table 1. Material properties

Property	unit	Value
Elastic Modulus ( $E$ )	MPa	4005
Poisson's ratio ( $\nu$ )		0.28
X-permeability ( $K_x/\gamma_w$ )	m/day	$1.86 \times 10^{-4}$
Y-permeability ( $K_y/\gamma_w$ )	m/day	$1.86 \times 10^{-4}$
Bulk Modulus of fluid ( $K_f$ )	MPa	$2.3 \times 10^{-4}$
Unit weight of solid ( $\gamma_s$ )	kN/m <sup>3</sup>	$0.28 \times 10^{-3}$
Porosity ( $\phi$ )		0.2
Bulk Modulus of solid ( $K_s$ )	MPa	$0.71 \times 10^{-6}$
Initial density of fluid ( $\rho_w$ )	ton/m <sup>3</sup>	1.0
Thermal coefficient of solid ( $\beta_s$ )	1/°C	$0.9 \times 10^{-5}$
Thermal coefficient of fluid ( $\beta_f$ )	1/°C	$0.65 \times 10^{-5}$
Specific heat of solid ( $c_s$ )	J/m <sup>3</sup> K	14.0
Specific heat of fluid ( $c_w$ )	J/m <sup>3</sup> K	4.0
Thermal conductivity of solid ( $\lambda_s$ )	W/mK	0.2
Thermal conductivity of fluid ( $\lambda_w$ )	W/mK	0.2

Table 2. Time steps for different time intervals

Time interval	Number of time steps
0.1	10
1.0	10
10.0	10
100.0	10
1000.0	10

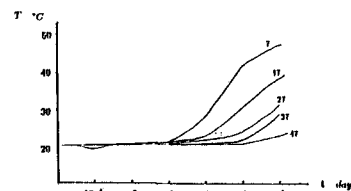


Fig.3 Temperature vs. time at different nodes

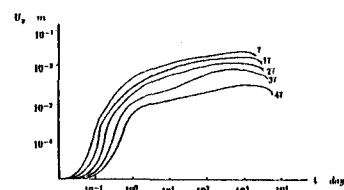


Fig.4 Displacements vs. time at different nodes

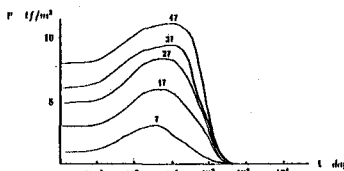


Fig.5 Pore pressure vs. time at different nodes

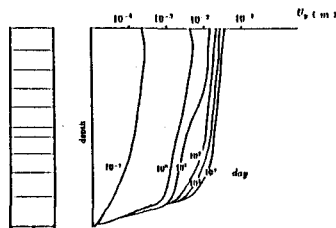


Fig.6 Displacements vs. time response

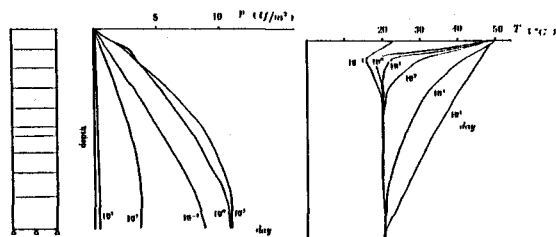


Fig.7 Pore pressure vs. time response

Fig.8 Temperature vs. time response

参考文献 1) R.J. Atkin and R.E. Craine: Continuum theories of mixtures. Basic Theory and historical development. Q. J. Math. Appl. Math., 29, 209-244, 1976. 2) Aydan, Ö, A. Ersen, Y. Ichikawa, T. Kawamoto: Temperature and thermal stress in concrete linings of shafts and tunnels due to hydration of cement. Proc. 9th Tech. & Sci. Min. Congr., 355-368, 1985.