

透水性地盤の熱移動解析及び 地盤特性による熱移動の考察

朴燦燻¹・風間基樹²・柳澤栄司³

¹正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

³正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

地盤における熱移動の問題を解く場合、熱伝導による熱移動以外に対流による熱移動及び固相と液相の間の熱伝達による熱移動も大きく影響されると考えられる。また、地盤で熱移動が行われる場合、その構成材料の熱物性は温度によって連続的に変化し、地盤中の熱移動(伝導、対流、熱伝達)に影響する。さらに、間隙流速の変化は熱伝達による熱移動に影響をおよぼすと考えられる。そこで、本研究は有限要素法による地盤の熱移動解析を行う際に、以上で述べた現象の影響を考慮に入れた熱解析の精度を高める手法を示したものである。また、室内模型実験を行って熱移動解析の結果と比較検討しその妥当性を検証した。

Key Words : heat transfer, porous media, permeable ground, FEM, heat exchange, convection

1. まえがき

地盤の物理的な性質の一つである熱的性質を理解するのは土を扱う広い分野の中で非常に重要な問題の一つである。土木分野においても廃棄物の地中処理、地中埋設物による熱収支の問題、地熱発電、凍土、凍結など地盤の熱的状態に関わっている問題は少なくない。それゆえ、近年、地盤の熱移動解析の必要性が高まってきている。

飽和した地盤の熱移動解析において最も簡単な方法は、土粒子の骨格及び間隙水のそれぞれの熱伝導率を用いて合成熱伝導率を求め、地盤を一つの複合物質とみなして解析する方法である。合成熱伝導率を求める方法としては直列法¹⁾、並列法¹⁾、De Vriesの方法²⁾、Kerstenの式³⁾、Johansenの方法⁴⁾などが知られている。このような解析方法は、粘土地盤などのように間隙水の移動が無視できるほど小さいと考えられる地盤において有効であると考えられるが、粗粒砂や岩盤内の破碎帯などのように、容易に浸透流が生じやすいような地盤への適用についてはその適用性に疑問が残る。この手法は地盤中の土粒子の温度と間隙水の温度が局所的に同一であると

いう仮定のもとに成り立っているが、実際の地盤の中では土粒子と間隙水の温度差から、土粒子と間隙水の間に絶えず熱伝達が行われていると考えられ、特に浸透流による熱輸送が顕著な場合にはその影響が重要な問題になると考えられる。

最近では、電子計算機の発達により地盤の熱移動に関わる問題を有限要素法や差分法を用いて数値解析することもしばしば行われている。これらの解析では土中水の流れや圧密、岩体に発生する応力などに関する問題を連成問題として取り扱う例が多い。例えば、Geraminegad⁵⁾は地盤の飽和度と水分移動を熱移動の影響因子として着目し、熱との連成問題として解析した。彼は相変化(液相から気相へ)が生じる場合、熱移動を一次元の問題を例として解析し、地盤の熱移動に及ぼす水分移動の影響を検討した。Utsugida⁶⁾は地下1000mの透水性岩盤に構築された放射性物質の貯蔵トンネルから発生する熱の移動を解析している。この場合、岩盤を二相系と考え、対流による熱移動の影響を考慮して熱収支を解析している。Britto. et al.⁷⁾は地盤中の熱源から発生する粘土地盤の圧密の問題を熱移動との連成問題として解析している。この場合、間隙水の移動速度が遅いため、

熱収支は熱伝導のみに依存させている。Hegab, H. E. et al.⁶⁾ は地盤中に複数の熱パイプがある場合、その配列（パイプの間隔と列の数）によって熱移動がどのように影響されるかを解析した。この場合、地盤は単一媒体として取り扱われているため対流の影響は考慮されていない。以上のように、地盤の熱的問題は、対象とする地盤や観点によって種々の仮定のもとに解析が行われているが、対流の影響と温度による熱物性値の変化の両者を考慮した例は少ない。

透水性飽和地盤を対象とした本研究の特色は、土粒子骨格を固相とし、間隙水を液相として、熱伝導はそれらで個別に行われると同時に液相と固相の間の熱伝達も起るようなモデルを考えたことにある。間隙水の流れの解析手法としては、非圧縮性流体解析において提案されている流れ関数と渦度を用いる方法を適用した。また、地盤で熱移動がある場合、地盤の温度は連続的に変化し、地盤材料の諸物性値を変化させ、熱移動現象に影響すると考えられる。例えば、温度の変化によって、固相と液相の熱伝導率が変化して伝導による熱移動に影響することが考えられる。また、温度の変化は液相の密度や粘性を変化させ、浮力と透水係数に影響し、浸透流速の変化をもたらして対流による熱移動に影響する。その浸透流速の変化は熱伝達による熱移動にも影響すると考えられる。さらに、二相の比熱の変化はエネルギー収支に関係し、熱移動の変化をもたらすと考えられる。そこで、本研究では温度によって地盤材料の物性値（熱伝導率、比熱、密度、粘性、熱伝達率、透水係数）が変化することを考慮した。

本研究で用いた支配方程式は温度によって地盤材料の物性値が変化することを考慮し、土中水の流れ、熱移動現象の相互作用の影響を考慮できるものである。さらに、この支配方程式をガラークイン法を用いて有限要素法による定式化を行い、これを用いた解析を行った。まず、簡単な地盤モデルから、地盤材料の特性値及び解析条件を変えたパラメータ計算を行い、その結果について考察を行った。さらに、一定の温度を持つ流体が輸送されるパイプが地中に埋設された場合とクラックが存在する地盤の計算を行い、その熱移動特性について考察した。特に、熱パイプが地中に埋設された場合については、室内実験を行って数値解析の結果と比較検討し、数値解析の妥当性を検証した。

2. 地盤中の熱移動に関する支配方程式

本解析では、主に次のような仮定を用いた。

- 1) 二次元の平面問題とする。
- 2) 飽和地盤を対象とし、固相と液相のみ存在する。
- 3) 地盤は等方な多孔質体である。
- 4) 熱伝導はFourier 則に従う。
- 5) 間隙水は非圧縮性で、流れは層流とする。
- 6) 間隙水の流れはDarcy則に従う。
- 7) 液相の密度と粘性、液相と固相の熱伝導率、固相の比熱と透水係数は温度により変化する。
- 8) 浮力はBoussinesqの近似が成立するとし、境界層内の局所における密度と、境界層外の密度差によって生じるものとする。

以上の仮定をもとに運動の方程式、流れ関数の方程式、液相と固相のエネルギーの方程式の四つの支配方程式の誘導を行う。

(1) 運動の方程式

一般に、粘性流体の運動方程式は、ナビエーストークスの方程式によって表現することができるが、間隙水の流速は一般的に遅いので移流項が無視できるとし、ナビエーストークス式のy成分に外力として重力gを付け加えて表すと次のようになる。

$$\rho_f \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\rho_f \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v - \rho_f \cdot g \quad (2)$$

ここで、uとvはxとy方向の速度成分、 ρ_f は水の密度、pは水圧、 μ は粘性係数、tは時間である。

式(1)は、定常状態では圧力と流速の間に

$$\mu \nabla^2 u = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

の関係にある。上の式に $p = \rho_f \cdot g \cdot h$ を代入して、Darcy則の仮定により $\partial h / \partial x = -u/k$ とすると、式(1)の粘性項は $-\rho_f \cdot g(u/k)$ で入れ換えられることになる。浸透流が非定常であっても、その速度の時間的变化はきわめて緩慢であることから擬定常流とみなし、以上のことが成り立つと近似する。同様に式(2)は $-\rho_f \cdot g(v/k)$ で入れ換えられるものとする⁹⁾。ここに、hは水頭、kは透水係数である。よって式(1)、(2)は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{g \cdot \rho_f} \right) - g \frac{u}{k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{g \cdot \rho_f} + y \right) - g \frac{v}{k} \quad (5)$$

となる。式(4), (5)で $H = p/(g \cdot \rho_f) + y$ とおくと両式は次のようになる。ここに、 H はピエゾ水頭で水圧による水頭と基準面からの高さ y の和である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{u}{k} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial H}{\partial y} + \frac{v}{k} \right) \quad (7)$$

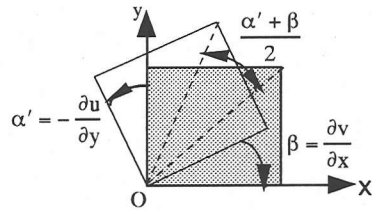


図-1 2次元の回転運動

一方、内田¹⁰⁾によればある時点における単位体積当りの浮力は、近似解としてその時点の境界層外の密度 $\rho_{f\infty}$ と境界層内のある地点の密度 ρ_f の差を用いて $(\rho_{f\infty} - \rho_f)g$ で表現することができるとしているので、ここでは浮力の算定にこの仮定を用いた。また、ある地点における密度は、初期密度 ρ_{f0} とその時の初期温度 T_0 を用いて次のように表わせる。

$$\rho_f = \rho_{f0} \{1 - \beta(T_f - T_0)\} \quad (8)$$

ここで、 T_f は間隙水の温度、 β は膨張係数である。

上式で ρ_{f0} は $\rho_{f\infty}$ に等しいとして置き換えれば、浮力は温度差と膨張係数で表現することができる。これを単位質量当りの浮力で表わすと $\beta \cdot g(T_f - T_0)$ になる。これを式(7)に外力項として加え、渦度 $\omega = (\partial v/\partial x) - (\partial u/\partial y)$ を導入するために x と y 成分の運動方程式をそれぞれ x と y で偏微分してひくと、運動の方程式は ω に関して次のように書ける。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -g \left(\frac{\omega}{k} - \beta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (9)$$

一方、透水係数はTerzaghiの経験式¹¹⁾に粘性係数の温度による変化を考慮して、温度依存性を表現する項を加えて式(10)のように与える。

$$k = \frac{C \cdot D_{10}^2}{\rho_{f0} \cdot \gamma_0 [1 - \beta(T_f - T_0)] 0.9796^{(T_f - T_0)}} \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt{1 - n}} \right) \quad (10)$$

ここで、 D_{10} は有効径、 γ_0 は T_0 のときの液相の動粘性係数、 n は間隙率であり、 C は実験定数で、 k は透水係数の次元を持つものとする。よって、運動の方程式は式(9)に式(10)を代入した形となる。

(2) 流れ関数の方程式¹²⁾

渦運動を特徴づける物理量として渦度を導入する。

図-1をみると正方形の中心が O の周りを角速度 $(\alpha' + \beta)/2$ で回転運動をしている。渦度は角速度の2

倍であるので渦度は次のように表わせる。

$$\omega = \alpha' + \beta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (11)$$

また、流れ関数 φ と流速の関係は $v = -\partial\varphi/\partial x$ 、 $u = \partial\varphi/\partial y$ で表わせる。この関係を上の式に代入することによって渦度の式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\omega \quad (12)$$

(3) エネルギーの方程式

地盤を構成する要素の熱的影響因子の温度条件による変化を考慮するために、まず熱伝導率について考察する。Johansen and Frivik¹⁾によれば土粒子の熱伝導率 λ_s は、石英含有率を基準として表わされるが温度による λ_s の変化を線形と仮定すると式(13)のように書ける。また、温度による水の熱伝導率 λ_f の変化はBridgman¹⁾によって式(14)のように表わされる。

$$\lambda_s = 1.06 \times 10^{-5} (T_s - T_0) + (7.7^q \times 2.0^{1-q}) / 4186.8 \text{ (kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \quad (13)$$

$$\lambda_f = \lambda_{f0} \cdot \{1 + 10^{-3} (T_f - T_0)\} \text{ (kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \quad (14)$$

ここで、 T_s は土粒子温度、 q は石英含有率である。また、実験値から求められた温度変化による比熱と粘性係数の変化は温度変化と線形関係にあると仮定すると次のように書ける。

$$C_s = (1 \times 10^{-3}) (T_s - T_0) + C_{s0} \text{ (kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \quad (15)$$

$$\mu = \rho_{f0} \cdot \gamma_0 [1 - \beta(T_f - T_0)] 0.979^{(T_f - T_0)} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (16)$$

ここで、 C_s は土粒子の比熱、 C_{s0} は T_0 のときの土粒子の比熱である。

温度の変化による水の密度の変化は式(8)を用いる。熱伝達係数 α については土粒子と間隙水の間

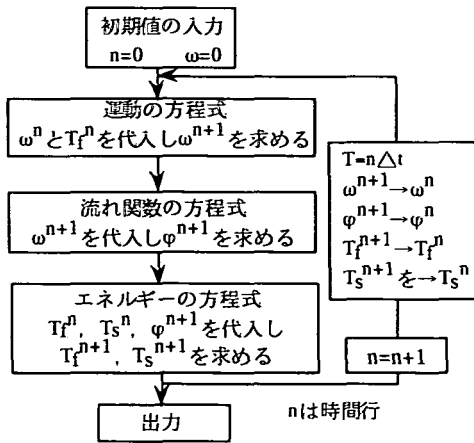


図-2 フローチャート

の熱伝達を考慮して、間隙水の流速の変化を反映できる次のような式¹³⁾を用いた。

$$\alpha = \frac{\lambda_f}{d} \cdot \left(2 + 0.52 \left(\frac{V \cdot \rho_f \cdot d}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{C_f \cdot \mu}{\lambda_f} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (17)$$

ここで、 d は土粒子の平均直径、 C_f は間隙水の比熱である。温度変化による熱伝達係数の変化は、式(17)の中に式(8)、(14)、(16)を代入すれば求まる。

一方、エネルギーの収支式は液相と固相と分けて考え、液相では熱伝導によるエネルギーの蓄積と熱伝達によるエネルギーの蓄積との和が、内部エネルギーの変化と対流による内部エネルギーの変化の和に等しいと考えた。また、固相では、熱伝導によるエネルギーの蓄積と熱伝達によるエネルギーの蓄積の和が内部エネルギーの変化と等しいと考え、液相と固相でそれぞれ次のように導いた。

$$n \cdot \rho_f \cdot C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + n \cdot \rho_f \cdot C_f \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} - v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = n \cdot \lambda_f \cdot \nabla^2 T_f - \alpha \cdot A (T_f - T_s) \quad (18)$$

$$(1-n) \rho_s \cdot C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-n) \lambda_s \cdot \nabla^2 T_s + \alpha \cdot A (T_f - T_s) \quad (19)$$

ここで、 A は土粒子の単位質量当りの表面積である。式(18)及び式(19)の諸係数に、式(8)、式(13)～(17)を代入すれば熱物性値の温度依存性および熱伝達の間隙流速依存性を表現することができる。

以上の運動の方程式、流れ関数の方程式、液相と固相のエネルギーの方程式を連立させて、図-2のフローチャートに従って、渦度、流れ関数、液相と固

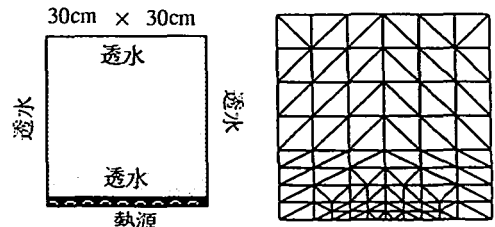


図-3 計算のモデルとメッシュ

表-1 計算の初期条件

間隙率		0.35
水の熱伝導率	kcal/(m·s·°C)	1.4×10^{-4}
土粒子の熱伝導率	kcal/(m·s·°C)	1.12×10^{-3}
石英含有率	%	70
水の比熱	kcal/(kg·°C)	1.0
土粒子の比熱	kcal/(kg·°C)	0.2
膨張係数	1/°C	4.0×10^{-4}
土粒子の平均直径	mm	0.5
土粒子の比表面積	m ² /kg	3.9
形状係数		10
熱源の温度	°C	55
モデルの初期温度	°C	15
土粒子の密度	g/cm ³	2.64

相の温度の順に求めてゆく。そのとき各時間ステップの各方程式において反復計算を行って解の精度を高めた。有限要素法による定式化の方法としては重み付き残差法を基にした近似解法で、重み関数に区分多項式を用いるガラーキン法を用いて定式化した。

3. 計算による熱移動の考察

地盤の熱移動に最も影響すると考えられる因子としては土の間隙率、土粒子の比熱及び熱伝導率などがある。ここでは、これらの値を変えて熱移動の計算を行い、その結果と土の物性値に関する既往の実験結果と比較して、本計算モデルの妥当性を検討した。また、温度依存性を考慮した場合としない場合の計算結果の差、及び、間隙流速が熱移動に及ぼす影響についても考察を行った。

数値解析は、図-3に示す地盤モデルを用いて、表-1の初期条件を基準として計算を行った。モデルの計算は、メッシュのように領域を80の節点、128の要素に分割して行った。また、スキームが安定になるようにクーラン数 C を $V\Delta t/G$ とし⁹⁾、 C を1より十分小さくして時間ステップ Δt を1秒にした。ただし、 V は最大間隙流速、 G はメッシュ中の要素の最

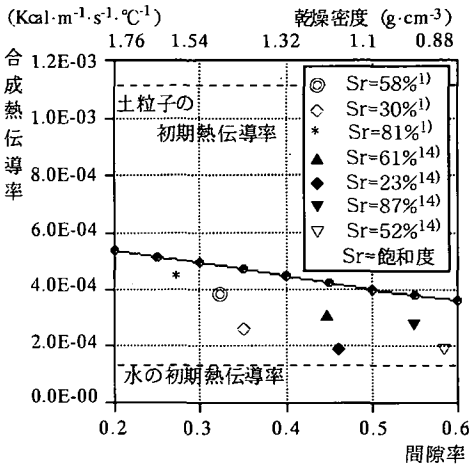


図-4 間隙率の違いによる合成熱伝導率

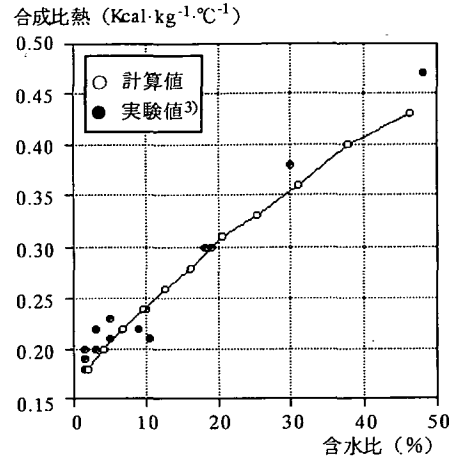


図-5 合成比熱と含水比

小辺の長さである。また、解析結果と実験値と比較するために逆計算による合成熱伝導率 λ を求めてみた。すなわち、計算で求めた温度分布を次のような Fourier 則による式に代入し、逆計算を行い、モデルの中央の横縦10cmの領域に対して λ を求めた。

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (20)$$

ここで、 ρ は土粒子と水の密度から求めた地盤全体の密度は $\rho = (1-n)\rho_s + n \cdot \rho_f$ である。比熱Cには、後述する合成比熱を用いて値を求めた。

(1) 間隙率

ここでは、土の熱伝導率に最も影響を及ぼすと考えられる土の間隙率の影響が解析モデルにおいてどの程度再現されているかを見るために計算を行ってみた。図-4は、間隙率の変化による合成熱伝導率への影響を示したもので表-1の条件で間隙率だけを0.2から0.6まで変化させながら計算したものである。横軸は間隙率および乾燥密度、縦軸は加熱後1時間ときの合成熱伝導率である。図中の黒丸および実線は計算値であり、他のプロットは松本¹⁾、Sawada et al.¹⁴⁾による各種の土についての実験値である。

図-4をみると間隙率が0.05増加するにつれ約4~5.2%の熱伝導率の減少がみられる。間隙率が大きくなると式(10)により透水係数が大きくなり、浮力の影響が大きくなる。そのため、対流及び熱伝達による熱移動はよくなる。しかし、通常自然対流のみ存在する地盤の熱移動に最も影響する熱伝導による熱移動は間隙率が大きくなると、水より通常、熱伝導率が8~10倍大きい土粒子が占める割合が少なくなると土粒子による熱伝導の影響が少なくなる。

ゆえに間隙率が大きくなると地盤の合成熱伝導率は小さくなる。

松本、Sawada et al.の測定値は飽和状態での値ではないため、合成熱伝導率と測定値の差はみられるが、飽和状態に近い測定値は逆計算による合成熱伝導率に近いことが判る。

(2) 土の比熱

本研究の計算方法は、土粒子と間隙水の比熱を別々に用いている。計算で用いた比熱の妥当性を検討するために、式(21)に示すような各相の質量比から合成比熱を求める式⁹⁾を用いて合成比熱を計算して、含水比との関係性を求めてみた。

$$C = C_s \cdot m_s + C_f \cdot m_f \quad (21)$$

ここで、 m_s と m_f は単位体積当りの土粒子と水の質量比である。図-5は地盤の合成比熱と含水比の関係を表わしている。図中の白丸は式(21)による計算値で黒丸はKerstenの実験値¹⁾であり、計算値と実験値は比較的よい一致をみせている。本研究は飽和地盤を対象としているため、含水比が大きいと、比熱が大きい水の割合が大きくなり、合成比熱が大きくなって領域の温度を上げるのに必要な熱量が大きくなると考えられる。

(3) 土粒子の熱伝導率

図-6は、合成熱伝導率に及ぼす土粒子の熱伝導率の影響を表わしたもので、石英含有率を50%、60%、70%、80%で変化させたとき、加熱1時間後の逆計算による合成熱伝導率を表わしている。これを式(13)を用いて土粒子の初期熱伝導率で書き直すと

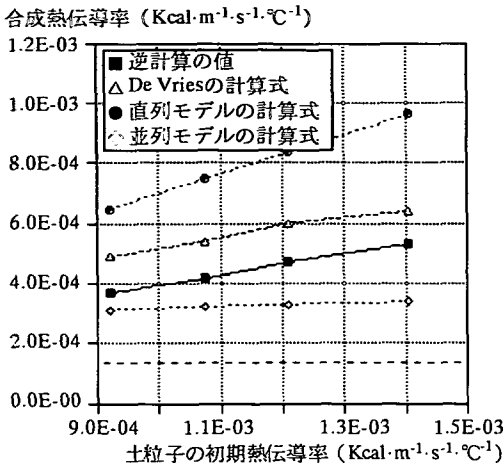


図-6 土粒子の熱伝導率の違いによる合成熱伝導率の変化

9.21×10^{-4} , 1.07×10^{-3} , 1.21×10^{-3} , 1.41×10^{-3} kcal·m⁻¹·s⁻¹·°C⁻¹になる。合成熱伝導率は土粒子の熱伝導率が約15%位大きくなるにつれ約5~10%程度増加する。また、一般的に使われる直列と並列モデルの熱伝導率計算式による計算値の間で分布し、De Vriesの式による計算値よりやや小さい熱伝導率の分布をみせるが、その傾向はよい一致をみせている。

一般に強制対流がない場合には、熱伝導による熱移動が卓越すると考えらる。その中でも土粒子の熱伝導率は水の熱伝導率と比べて大きく、また、地盤材料中で土粒子の占める割合も大きいので、地盤の温度分布に大きく影響すると考えられる。以上のことから土粒子の初期熱伝導率が地盤の合成熱伝導率に大きく影響する因子と考えることができる。

(4) 材料物性値を一定とした場合との比較

地盤材料の物性値を一定とした場合と温度によって変化する場合の計算結果を比較する。前者の場合は表-1の初期条件をそのまま一定値として計算し、後者の場合は表-1を初期条件として温度依存性を考慮して計算する。ここでは比較のため、水と土粒子の熱伝導率を変化させて考察する。

図-7をみると水の場合、温度依存性を考慮した方が全体的に高い温度分布をみせる。一時間経過では両者の結果はほとんど差がないが5時間経過の場合にはその差が大きくなる。これは、温度依存性を考慮すると水の熱伝導率は温度上昇につれ大きくなるからである。また、間隙率が大きいほどその差は大きくなると予測できる。

図-8は、土粒子の熱伝導率を一定値と可変値として扱った場合の温度分布の比較を行ったものである。土粒子の熱伝導率は温度の上昇につれ小さくなるの

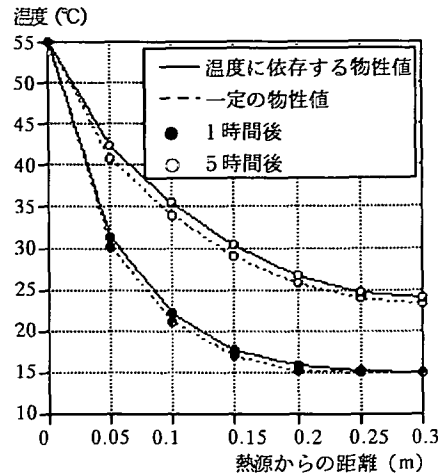


図-7 水の熱伝導率を可変値と一定値で計算した結果

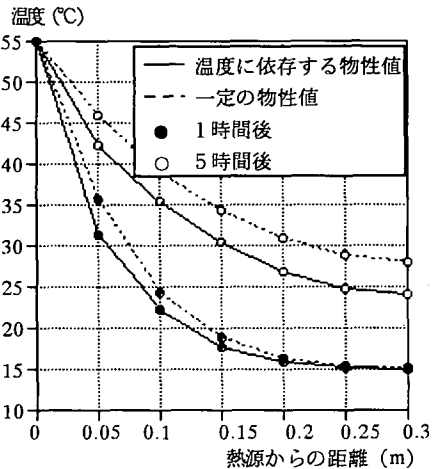


図-8 土粒子熱伝導率を可変値と一定値で計算した結果

で、熱伝導率を一定とした場合の温度分布の方が高い。その差は、図-7に示す水の場合より大きく、時間の経過と共に広がる。これは土粒子の熱伝導率が水のそれより通常約8~10倍ぐらい大きく、温度条件による熱伝導率の変動の幅も大きいからである。

(5) 相対温度上昇率

ここでは熱物性値の非線形性の影響を明らかにするために、計算結果に表われる影響を相対温度上昇率を用いて考察した。

ここで言う相対温度上昇率とは、初期と熱源の温度差に対する、考えている位置での温度上昇の比率であり、式(22)のように定義する。

$$Tr(\%) = \frac{T - T_0}{T_H - T_0} \times 100 \quad (22)$$

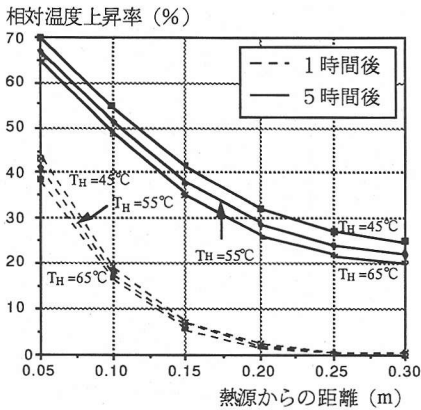


図-9 熱源による温度上昇率

ここで、 T はある位置での温度、 T_H は熱源の温度である。図-9は熱源の温度による相対温度上昇率を表わし、縦軸は相対温度上昇率 T_r を表わすし、グラフの上の線から熱源温度が45°C、55°C、65°Cのときの温度上昇率を表している。

この図から明らかなように、熱源温度が低いほど温度上昇率が高い。これは、通常地盤の熱移動の中で熱伝導による熱移動の影響が最も大きいからである。熱伝導の中では、水の熱伝導の影響より土粒子の熱伝導の影響が大きいためである。すなわち、水の熱伝導率は温度が高いほど大きくなるが、土粒子の熱伝導率は温度が高いほど小さくなるので、全体的な温度上昇率は、熱源の温度が高いほど小さくなる。また、土粒子と水の比熱も温度が高いほど大きくなるので熱源の温度が高いほど温度上昇に必要な土粒子と水の熱量は増えるので、温度の上昇率は小さくなる。

(6) 間隙流速

透水係数が比較的大きい地盤では、間隙水の流動がある場合には対流による熱移動の影響が無視できないと考えられる。ここでは、地盤全体の熱伝導に及ぼす間隙流速とその方向の影響について考察した。

透水係数が 2×10^{-4} m/sec程度の比較的大きい粗砂の地盤を対象とし、動水勾配を0から0.4まで変化させた地盤モデルを考え、計算を行なった。地盤の初期条件は、熱源の温度25°C以外は表-1のようである。境界の一面に25°Cの一定の温度を与え、領域内に33.3°C/mの温度勾配を与え、モデル中に熱フラックスを流させる。また、解析モデル中の境界面に一定の間隙流速を生じさせるために流れ関数を与える。この対流の流速を0から 8×10^{-5} m/secまでの範囲に変化させながら逆計算による合成熱伝導率の変化を

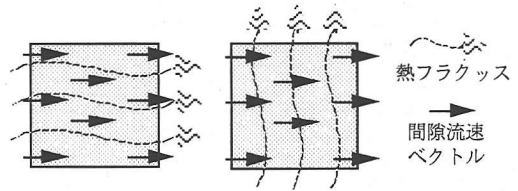


図-10 平行流れと直交流れ（初期値）

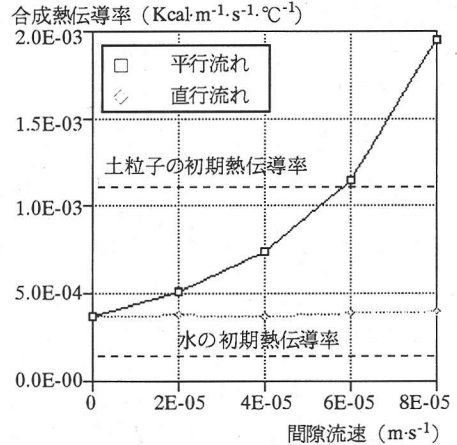


図-11 間隙流速の違いによる合成熱伝導率

考察する。また、熱フラックスと間隙流速の与える方向を図-10に示すように平行と直交の二種類について解析した。

図-11は間隙流速の変化による1時間後の合成熱伝導率の分布である。水流と熱流を直交させた場合、流速の変化による合成熱伝導率の変化はほとんどないし、間隙流速がない場合との合成熱伝導率の差もほとんどない。これは間隙水が熱フラックスと直交に流れ、間隙水はほとんど温度勾配のない領域に流れ、強制対流による熱の移動はほとんど起こらないからである。しかし、領域中の温度分布の差で生じる浮力の影響で、間隙水と熱フラックスが完全に直交に流れていないため、実際のデータでは間隙水の動きがない場合の熱伝導率よりはやや高い熱伝導率の分布をみせる。

平行流れの場合は、間隙流速が $0 \sim 5 \times 10^{-5}$ m/secまでは、初期条件として入力した水と土粒子の熱伝導率の間で合成熱伝導率が分布するが流速が 6×10^{-5} m/sec以上では土粒子の熱伝導率を越えた熱伝導率の分布をみせる。また、流速が早いほど熱伝導率の増加率も大きい。これは間隙水が熱フラックスと同じ方向に流れるので加熱された間隙水が熱を持って低温の領域に移動して対流による熱移動と、高い温度を持った水と土粒子との間で活発な熱伝達が起こるためと考えられる。

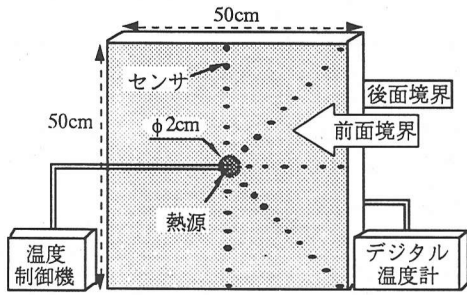


図-12 実験のモデル

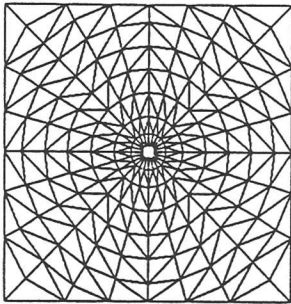


図-13 メッシュ

表-2 実験と計算の初期値

	ケース1	ケース2	ケース3
水の熱伝導率	1.4×10^{-4} kcal/(m·s·°C)		
土粒子の熱伝導率	1.12×10^{-3} kcal/(m·s·°C)		
水の比熱	1.0 kcal/(kg·°C)		
土粒子の比熱	0.2 kcal/(kg·°C)		
間隙率	0.4	0.42	0.44
土粒子の密度	2.53 g/cm ³	2.64 g/cm ³	2.64 g/cm ³
土粒子の平均直径	0.5 mm	1.2 mm	2.1 mm
土粒子の比表面積	7.1 m ² /kg	3.9 m ² /kg	2.1 m ² /kg
形状係数	10		
熱源の温度	80 °C		
モデルの初期温度	18 °C		
膨張係数	4.0×10^{-4} 1/°C		

4. 地盤モデルによる熱移動実験と計算値との比較

ここでは、一定の熱を持つ流体が輸送されるパイプが地盤中に埋設された場合を考え、室内実験と計算を行う。透水性が異なる三つの地盤を考え、その実験と計算の結果より、対流による熱移動と熱伝達による熱移動の影響を考察する。

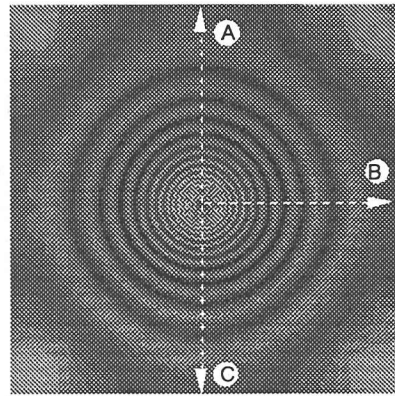


図-14 ケース1の3時間後の等温線（計算値）

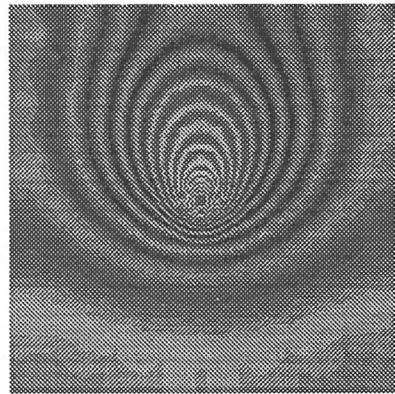


図-15 ケース2の3時間後の等温線（計算値）

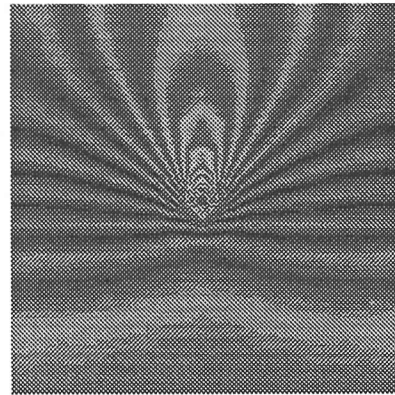


図-16 ケース3の3時間後の等温線（計算値）

実験は、均等な粒度で構成され、飽和された砂地盤を対象に、表-2のような三つのケースの初期条件を持った材料を用いて、図-12のようなモデルを制作して行った。実験の方法は、温度制御機を利用し

て、一定に温度を保つようにした中央の熱源からモデルを加熱させ、モデル中に挿入したセンサよりデジタル温度測定機で温度を測定する方法で行った。

計算は図-13のように地盤モデルの領域を208の節点、368の要素で分割し、時間ステップは1秒とした。実験モデルを可能な限り表現できるように熱パイプの境界と地盤モデルの境界は不透水の条件で行った。材料の初期条件は実験と同じように表-2である。

三つのケースの主な違いは、粒径がそれぞれ異なることから透水係数が異なること、また、粒径の違いで比表面積が異なることなどである。

図-14, 15, 16は計算による3時間後の三つのケースのそれぞれの等温線図である。ここで、熱源から鉛直上方向をA方向、側方向をB方向、鉛直下方向をC方向と呼ぶことにする。

材料の粒径が大きいことは式(10)により透水係数が大きいことになり、間隙流速が早くなることになる。そのため、これらの図では、粒径が大きい条件ほど対流による熱移動が大きくなって、A方向の等温線の広がりが目立つが、逆に、C方向では等温線が狭まる。つまり、粒径が大きい場合には領域中の温度分布は一樣でないことが分かる。ケース1の等温線図では、熱源を中心として温度分布が対称に見えるが、AとC方向の実際のデータでは、大きいところで約1.5~2°Cの差が見られる。また、図示した等温線は加熱から3時間後の温度分布であるが、更に時間の経過と共に各方向の温度分布の差、各ケースの温度分布の差はもっと広がる。

三つのケースの加熱後2時間のA方向の実験値と計算値を比較してみると、図-18に示すようにその温度差は大きい所で実験値が計算値より7°C位低かったが、全体の傾向は計算の結果とよい一致をみせた。また、領域中の各方向での温度分布を、ケース2についてみると図-19に示すように実験値と計算値の差はあるが同じ傾向をみせた。これらの差は、実験装置の製作の際にモデルの前面と後面に断熱材を入れたが、その面からの熱損失を完全には防げなかったのが原因と思われる。

また、ケース2を例として挙げてみると、図-19に示すようにA, B, C各方向の温度差がみられる。これは地盤の熱移動方法すなわち伝導、対流、熱伝達の三つによって伝わる熱量の差に起因すると考えられる。A方向では、熱源で加熱された間隙水は密度差による浮力によって図-17のように鉛直上方に流れる。この流れによって対流による熱移動が活発に行われる。そのときの高い温度と早い流速をもった間隙水と土粒子の間に熱伝達が行われる。高い温度

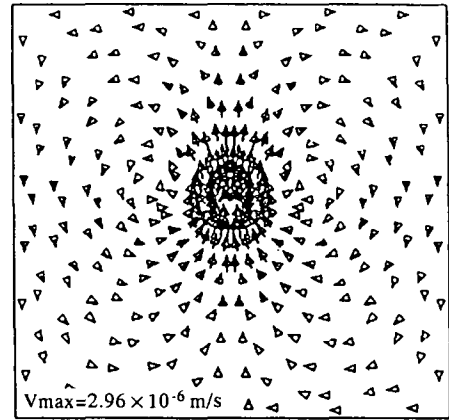


図-17 ケース2の3時間後の間隙流速ベクトル図 (計算値)

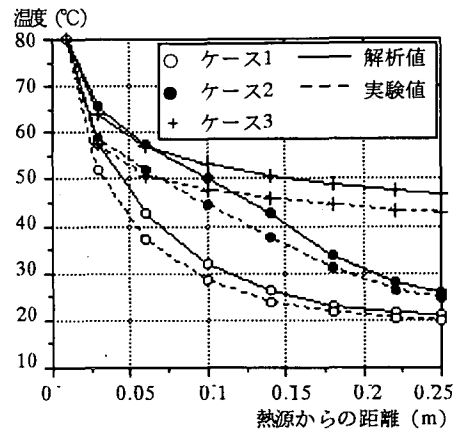


図-18 A方向の2時間後の実験と計算比較

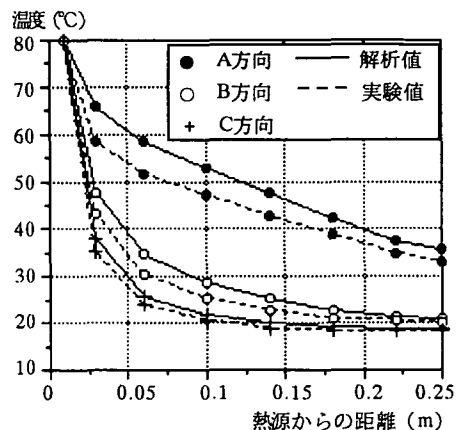


図-19 ケース2の3時間後の実験と計算比較

分布は温度依存性により透水係数を大きくさせて対流、熱伝達による熱移動を加速させる。C方

向では、図-17のように下の境界面から低い温度の間隙水が熱源の方に流れ、対流によって温度の上昇が抑制される。また、熱伝達も境界面から入った低温の間隙水と熱伝導によって暖まった土粒子の間で行なわれ領域の温度の上昇は抑制される。このため、透水性が良い条件ほどC方向では低い温度分布を示すものと考えられる。熱伝導に関しては、厳密に言えば時間が経つとA方向の温度分布が高くなるので、土粒子の熱伝導率が温度依存性によって小さくなる。そのため、熱伝導による熱移動はA方向で一番小さいと考えられる。しかし、その熱伝導による熱移動の差は少ないことから、熱源から三つの方向の温度分布の差は上で述べたような対流による熱移動の差で生じると考えられる。このことから透水性地盤の熱移動を精度よく表現するためには、伝導による熱移動以外に対流による熱移動、熱伝達による熱移動も考慮する必要があると言える。特に、長時間の現象を解析する必要がある場合、また、間隙率が大きく透水係数が大きい場合、あるいは、動水勾配が大きい場合、熱源と領域の温度差が大きい場合などでは、対流による熱移動量が無視できないと考えられる。

5. クラックが存在する場合の計算例

地盤の中に図-20に示すように縦横1mの領域を考え、その領域内に水だけが充満した幅12cmのクラックが存在するモデルを用いて計算を行った。

計算は実際の地盤のようにクラックの境界と地盤のすべての境界は透水で、熱源の境界は不透水の条件で行った。初期条件は表-2と同じである。また、クラック中の間隙率を1とし、クラックと地盤の間では局所的に土粒子と水の温度が同一であると仮定する。クラック中の運動方程式は、移流項と粘性項を含んだナビエーストークスの式を用いて、2章と同じ方法で誘導した式(23)を用いた。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + g \cdot \beta \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma \nabla^2 \omega \quad (23)$$

図-21は、上述の条件で求めた等温線図であるが、この図をみるとクラックの左側は熱の移動がほとんど行われていないことが知られる。この原因は、図-20の間隙流速ベクトルの分布から明らかのように、クラックの底側から初期温度のままの水がクラック中に入り込み、比較的大きな流速で境界の外に流出するので、クラック中では大きな温度上昇はない。

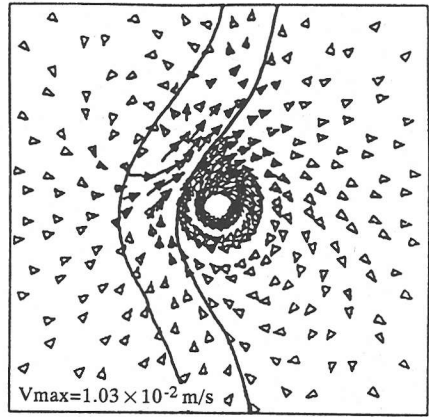


図-20 3時間後の間隙流速ベクトル図

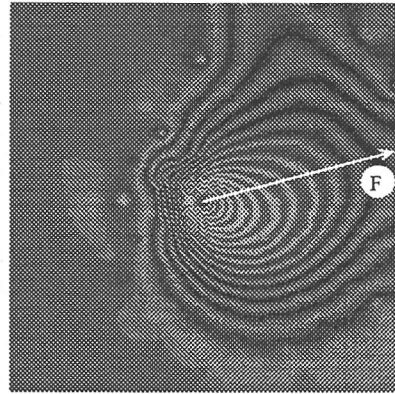


図-21 3時間後の等温線

さらに、図-20に示すように地盤の左境界の外側から初期温度のままの間隙水がクラックの方に流れ込み、この対流によって温度の上昇が緩和される。このため、クラックの左側では、熱移動はほとんど起こらないと考えられる。また、熱源の左付近で加熱された間隙水が、浮力によってクラックに沿って上方向に流れる。その流速はモデル全体の流速と比べて大きいので、その影響で間隙水の渦運動が影響され、図-20のように時計方向に回る。熱源の上で加熱された高温の間隙水は右方向に流れるので、対流と熱伝達により、熱源の右側(F方向)で熱移動が活発に行われるので温度上昇が著しいと考えられる。

以上述べたように、地盤内にクラックのような透水性の著しく異なる部分が存在した場合には従来用いたような平均化した熱物性を用いる解析結果とは著しく異なる結果が得られる。本研究に示した解析手法は、このように材料の分布が均質ではない地盤の熱移動の解析には有効であり、今後更に計算方法

に改良を加えれば、より現実的な解析が可能となると考える。

6. 結論

本研究では有限要素法による地盤の熱解析を行う際に、対流と熱伝達による熱移動および材料の温度依存性を考慮して熱解析の精度を高める手法について論じたものであり、この手法を用いた数値解析と室内模型実験により次のような結論を得た。

(1) 有限要素法による地盤の熱解析を行う際に、熱伝導、対流、熱伝達による熱移動を考慮し、地盤の熱移動現象を表現する手法を提案した。

(2) 本研究で提示したモデル化の手法を用いれば、地盤材料の熱伝導率などの熱物性値を比較的良好に近似できることが示された。

(3) 地盤の構成材料の物性値の温度依存性および間隙流速依存性を考慮した数値解析と室内実験により、地盤の熱移動現象に及ぼす間隙率、熱伝導率、透水性の影響を確認した。また、数値解析を通じて、クラックが熱移動に及ぼす影響についても検討した。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土の凍結-その制御と応用，1982.
- 2) De Vries, D.A.: Analysis of porous thermal insulating materials, *Industrial and engineering chemistry*, Vol.49, No.11, 1957.

- 3) Kersten, M.S.: Specific heat tests on soils. *Proc. 2nd I.C.S.M.F.E.*, Vol.3, 1948.
- 4) Johansen, O.: Thermal conductivity of soils, *Ph. D. Thesis, Trondheim University*, Norway, 1975.
- 5) Geraminegad, M. and Saxena, S. K.: A solution of coupled heat-moisture transfer in saturated-unsaturated media, *5th Inter. Con. Numerical Methods*, Vol.2, 1985.
- 6) Utsugida, Y.: Coupled analysis of flow and heat around a high-level nuclear waste repository, *5th Inter. Con. Numerical Methods*, Vol.1, 1985.
- 7) Britto, A. M. and Booker, J. R.: Finite element analysis of the coupled heat flow and consolidation around hot buried objects, *Soils And Foundations*, Vol.32, No.1, 1992.
- 8) Hegab, H. E. and Colwell, G. T.: Thermal performance of heat pipe arrays in soil, *Numerical Heat Transfer*, 1994.
- 9) 大西和榮：パソコンによる流れ解析，朝倉書店，1986.
- 10) 内田秀雄：伝熱工学，裳華房，1978.
- 11) 久保田敬一，河野伊一郎，宇野尚雄：透水-設計へのアプローチ，鹿島出版会，1976.
- 12) 清水正之，前田昌信：流体力学の学び方，オーム社，1990.
- 13) 柳沢一郎，西尾茂文：伝熱工学，朝倉書店，1992.
- 14) Sawada, S. and Ohno, T.: Laboratory studies on thermal conductivity of clay, silt and sand in frozen and unfrozen state, *4th. Inter. Sym. on Ground Freezing*, Vol.2, 1985.

(1996.8.14受付)

HEAT TRANSFER ANALYSES IN GROUND CONSIDERING CONVECTION AND HEAT EXCHANGE AND A STUDY OF AFFECTING BY THERMAL PROPERTIES OF GROUND

Chan Hoon PARK, Motoki KAZAMA and Eiji YANAGISAWA

Heat transfer of ground which is assumed as a composition of soil grain and water is affected by various thermal properties of the materials. It seems that in case of real permeable grounds heat transfer by convection also should be considered in addition to the heat transfer by conduction. This paper describes FEM analyses in which the effects of conduction as well as convection are taken into account in heat transfer phenomenon. Then numerical results of parametric analysis concerning the variation of different material properties like porosity, specific heat, and thermal conductivity are discussed. Finally, presented analytical method is applied to the ground with linear heat source and a crack filled with water.