

地下水位及び地下水流が地下空間の熱効率に及ぼす影響

EFFECT OF GROUND WATER LEVEL AND SEEPAGE VELOCITY ON HEAT LOSS IN UNDERGROUND SPACE

朴 燦 燾*・風間 基樹**・柳澤 栄司***

Chan Hoon PARK, Motoki KAZAMA and Eiji YANAGISAWA

So far the heat loss of underground space was considered from the aspect of internal factors such as the material of structure, the shape and insulation material and so on. This paper describes about the effect of external factors on heat loss in underground space by means of two-dimensional FEM analysis. Variation of ground water level, seepage velocity were considered as external factors affecting the heat loss. Two phase natures were also considered in governing equations. It is found from this study that the higher the water level is and the faster the seepage velocity is, the greater the heat loss is. In addition, the effect of nature convection on heat loss is existent more than 1.0×10^{-5} cm/s coefficient of permeability of ground.

Key Words: heat loss, heat transfer, ground water level, seepage velocity, numerical analysis

1. まえがき

空間の有効利用，地上環境の破壊防止，エネルギーの節約，災害に対する安全性などの利点から地下空間は最近30年の間に急激に増加しており，地下街だけでもその総面積は，昭和31年から昭和55年の間に160倍以上に増加している．また，人間が居住する地下空間や地下利用の増加に伴ってその熱効率への関心も高まっている．

地下空間の熱損失を計算する代表的方法としてはCEN/ISOの方法¹⁾，Mitalasの方法²⁾などが挙げられる．これ他に，地盤を有限な厚さの多層壁とみなして，定常熱流計算によって熱損失を求めるWangのInsulation Walls in the Earth as an Insulator Method³⁾，Boileau and LattaのEarth as an Insulator Method³⁾などもある．最近では，電子計算機の発達により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，主に地盤の熱物性値，地下空間の壁体仕様，断熱材などの因子が熱負荷に及ぼす影響について検討している．例えば，下田・花井ら⁴⁾は，地下空間の実測結果と差分法による二次元熱伝導解析結果より，地下空間の気温と湿度に対する諸因子の影響を検討すると共に壁体の吸放熱を求めた．赤坂⁵⁾は地盤の温度が一定の場合，床面及び地下壁面の表面温度分布を差分計算により求め，これらの部位の熱損失を計算している．これらの検討は，主に構造・材料的観点から地下空間の形状，地下構造物の材料，地中断熱材などを地下空間の熱環境に及ぼす内的因子として扱い，また外的因子として地盤の熱物性値に着目したものである．

地盤工学的観点からみると，地下空間の熱損失に及ぼす外的影響因子は地盤の熱物性値だけではなく，地

* 正会員 工修 東北大学助手 大学院工学研究科 土木工学専攻

** 正会員 博士（工学） 東北大学助教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

*** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

下水環境も地下空間の熱収支に影響すると考えられる。日本の地下水文の特徴は地下水位が比較的高く、地下水位の涵養が活発であると言われる。実際、首都圏では揚水規制により平均地下水位は地表面から約15mの深さまで上昇し、高い所では地下10m程度の深さまで上昇しているところもある⁶⁾。また、日本の地下水位変動パターンは5月から6月にかけて急上昇し、7月から8月にかけて安定し、10月以降、翌年4月までは降下する傾向を示している。その水位変化の差は約3m以上（愛知県一宮市、1973年）に達する⁷⁾。一般的に地盤の熱伝導率は間隙水に大きく影響されるので、地下水位の変動は地下空間の熱効率に影響すると考えられる。また、地下空間の熱環境に影響を及ぼす地下水環境としては、地下水の移動も考えられる。地下の自然状態の動水勾配は、一般に大きいものではないがゼロではない。また、日本の平均的な地下水の移動距離が一日に0.1mから10mぐらいの値であること⁸⁾を考えると、地下空間の熱損失問題を考える際に伝導による熱移動だけではなく、移流による熱移動も考慮する必要がある。また、比較的高い透水性がよい飽和地盤に囲まれた地下空間の場合には、暖められた水の浮力によって対流が生じ、地下空間の熱効率にも影響すると考えられる。

本研究では、以上に述べたように、地下水位の変動と地下水の移動などの外的要因が地下空間の熱効率に及ぼす影響を考察するため基礎的な数値解析を行った。計算は著者らがコード化した二次元有限要素法で行った。解析では、地盤を地下水面上部と下部に分けて考え、地下水面上部では土を土粒子（固相）と間隙（気相）から成る二相系媒体ととらえ、熱伝導はそれらで個別に行われると同時に熱伝達によって固相と気相は熱交換するものと考えた。地下水面下部では土を土粒子（固相）と間隙水（液相）から成る二相系媒体と考え、熱伝導・熱伝達によって熱移動すると同時に液相の対流を考慮した。対流による熱移動は、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て熱移動と連成解析した。

なお、実際の地盤においては、地下水面（大気圧に相当する面）上部の地盤は、毛管飽和帯と包気帯で構成され、一般にある飽和度を持っていると考えられる。この部分の飽和度は、その地盤を構成している土質に大きく関係しており、細粒分の多い土ほど飽和度の高い領域が多くなっていると考えられる。当然のことながら飽和度の違いによって土の熱伝導率も変化する。例えば、ロームの場合の実験結果によれば、低含水状態で水分の影響は小さく、含水比20%を越えたあたりから水分の影響が顕著になる傾向が報告されている⁹⁾。本研究では、特定の場所・土質を対象にしていないこと、上記のように低含水状態では水分の影響が小さいと考えられることから、地下水面上部は、水分を含まない乾燥した状態として理想化し扱うこととした。なお、特定の場所を対象とした場合には、地下水面上部の飽和度分布を調査し、土の熱伝導率に及ぼすその効果を考慮した方が、より現実的な結果を与えることになる。

2. 解析手法

本解析に用いた手法では、主に次のような仮定のもとに渦度の式、流れ関数の式、熱エネルギーの収支式、熱損失量の式を導いて、支配方程式としている。

- 1) 二次元の平面熱問題を対象とする。
- 2) 地下水面上部では、固相と気相のみ存在し、下部では固相と液相のみ存在する。
- 3) 地下水面上部では伝導と伝達によって熱移動し、下部では伝導・伝達・対流によって熱移動する。
- 4) 地盤は等方な多孔質体である。
- 5) 熱伝導はFourier則に従う。
- 6) 間隙水は非圧縮性で、流れは層流とする。
- 7) 間隙水の流れはDarcy則に従う。
- 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。
- 9) 地下空間内の熱移動は考慮しない。すなわち、境界条件として地下空間は一定の温度を保つものと仮定

する。

2・1 支配方程式

(1) 渦度の式

一般に、粘性流体の運動方程式は、Navier-Stokesの方程式によって表現することができるが、地下水の流速は十分に遅く、場所的な変分も小さいとし、移流項が無視できるとした。また、Navier-Stokes式のy方向には、外力として重力 $\rho_f \cdot g$ が作用する。

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

ここに、 u と v は x と y 方向の速度、 ρ_f は水の密度、 p は水圧、 μ は水の粘性係数、 t は時間、 g は重力加速度である。

ここで、定常状態における圧力と流速の関係 $\mu \nabla^2 u = \partial p / \partial x$ が、浸透流速が遅くレイノルズ数が小さいことから非定常状態でも近似的に成立するものとする。この式に $p = -\rho_f \cdot g \cdot h$ を代入して、Darcy則により $\partial h / \partial x = u / k$ とすると式(1)の粘性項は $-\rho_f \cdot g \cdot (u / k)$ で入れ替えられる。また、 $p / (\rho_f \cdot g) + y$ を H とおいて整理すると式(1)は式(3)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の和であり、 h は水頭、 k は透水係数である。同様に式(2)は式(4)になる。このような取扱いは、地下水流れの解析において一般的に用いられている近似である¹⁰⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{u}{k} \right) \quad (3) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial H}{\partial y} + \frac{v}{k} \right) \quad (4)$$

また、式(4)に外力項として浮力を加え、式(3)と式(4)をそれぞれ x, y で偏微分して式(3)から式(4)を引くと、渦度の式は次のように書ける。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -g \left(\frac{\omega}{k} - \beta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5)$$

(2) 流れ関数の式

一般に渦度の式は $\omega = (\partial v / \partial x) - (\partial u / \partial y)$ と書ける。また、流れ関数 φ と流速の間は $v = -\partial \varphi / \partial x$ 、 $u = \partial \varphi / \partial y$ の関係にあるので、この関係を渦度の式に代入することによって流れ関数と渦度 ω の関係は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\omega \quad (6)$$

(3) 熱エネルギーの収支¹¹⁾

熱エネルギーの収支は地下水面上部と下部に分けて考えた。地下水面上部は固相と気相で構成され、各々の相での容積要素中の熱エネルギーの収支は、熱伝導による熱エネルギーの蓄積と熱伝達による熱エネルギーの蓄積との和が、容積要素中の熱エネルギーの時間的な変化に等しいとした。一方、地下水面下部での熱エネルギーの収支は、固相では熱伝導による熱エネルギーの蓄積と熱伝達による熱エネルギーの蓄積の和が容積要素中の熱エネルギーの時間的な変化と等しく、液相では熱伝導による熱エネルギーの蓄積と熱伝達による熱エネルギーの蓄積との和が、容積要素中の熱エネルギーの時間的な変化と対流による熱エネルギーの変化の和に等しいとした。以上から、式(7)～(10)が各相の熱エネルギーの収支を表す式である。

$$\text{地下水面上部 (固相)} \quad (1-n)\rho_s \cdot C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-n)\lambda_s \cdot \nabla^2 T_s + \alpha_{as} \cdot A_s (T_a - T_s) \quad (7)$$

$$\text{(気相)} \quad n \cdot \rho_a \cdot C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = n \cdot \lambda_a \cdot \nabla^2 T_a - \alpha_{as} \cdot A_s (T_a - T_s) \quad (8)$$

$$\text{地下水面下部 (固相)} \quad (1-n) \rho_s \cdot C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-n) \lambda_s \cdot \nabla^2 T_s + \alpha_{fs} \cdot A_s (T_f - T_s) \quad (9)$$

$$\text{(液相)} \quad n \cdot \rho_f \cdot C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + n \cdot \rho_f \cdot C_f \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} - v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = n \cdot \lambda_f \cdot \nabla^2 T_f - \alpha_{fs} \cdot A_s (T_f - T_s) \quad (10)$$

ここに、添字 s, f, a は固相、液相、気相の諸元であることを表わしている。また、n は間隙率、C は比熱、T は温度、λ は熱伝導率、A_s は土粒子の単位質量当りの表面積、α_{as} は気相と固相の間の熱伝達係数、α_{fs} は液相と固相の間の熱伝達係数である。

(4) 熱損失量の式

地下空間からの熱損失量は熱量保存則により、周辺地盤領域の温度上昇に全て用いられる。固相、液相、気相での単位奥行き当たりの各熱損失量は次のように書ける。各相への熱損失量の和が地下空間の熱損失量になる。

$$\text{(固相)} \quad \frac{dQ_s}{dt} = (1-n) \cdot C_s \cdot \rho_s \cdot A_w \cdot \delta z \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (11)$$

$$\text{(液・気相)} \quad \frac{dQ_{f,a}}{dt} = n \cdot C_{f,a} \cdot \rho_{f,a} \cdot A_w \cdot \delta z \cdot \frac{\partial T_{f,a}}{\partial t} \quad (12)$$

ここで、Q は熱損失量、A_w は伝熱面積、δz は単位奥行き長さである。

以上の、式(5)の渦度の式、式(6)の流れ関数の式、式(7)～(10)の熱エネルギーの収支式と式(11)、(12)の熱損失量の式を支配方程式として用いた。

2・2 計算の流れ

渦度の式、流れ関数の式、熱エネルギーの収支式、熱損失量の式を連立させ、重み関数に区分多項式を用いる Galerkin 法を用いて空間的に離散化した。また、時間領域では Δt のきざみで計算を行うが、未知関数項 ω、φ、T_s、T_f、T_a は、n ステップでの値と、n+1 ステップでの値を用いて、クラנק・ニコルソン法により時間的に近似して表わした。n は時間きざみの計算ステップを表わす。

計算の流れを図-1 に示す。まず、地下水面下部では n ステップの渦度 ωⁿ と T_fⁿ を用いて n+1 ステップの ωⁿ⁺¹ を計算する。計算された ωⁿ⁺¹ を用いて流れ関数の式から φⁿ⁺¹ を求め、その値と T_sⁿ、T_fⁿ を熱エネルギーの収支式に代入し、

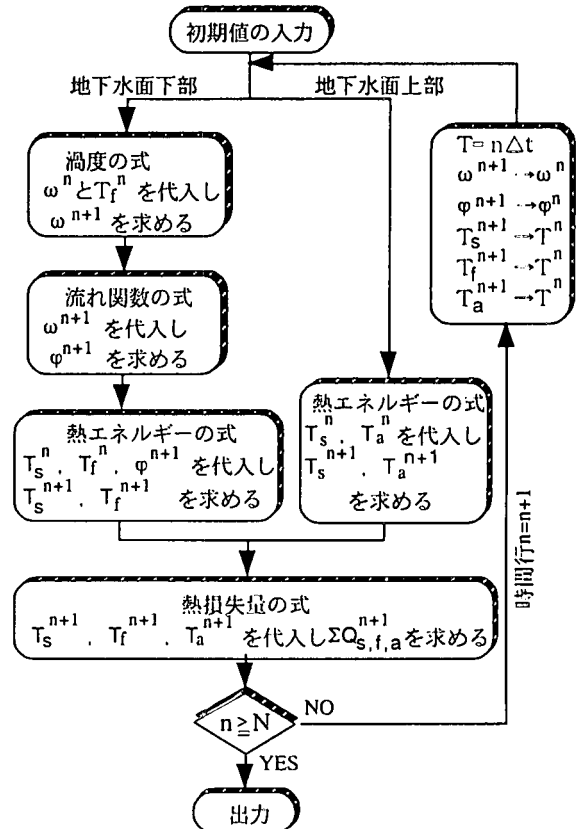


図-1 フローチャート

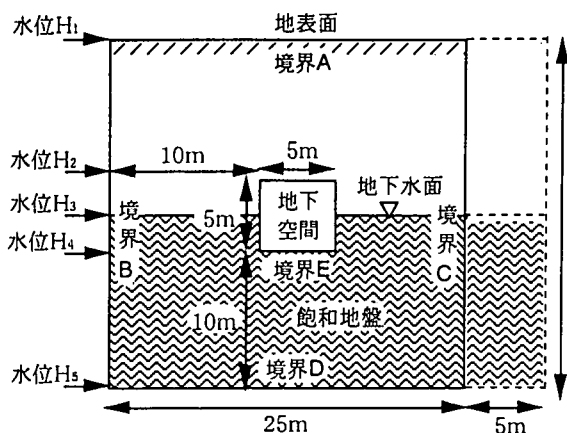
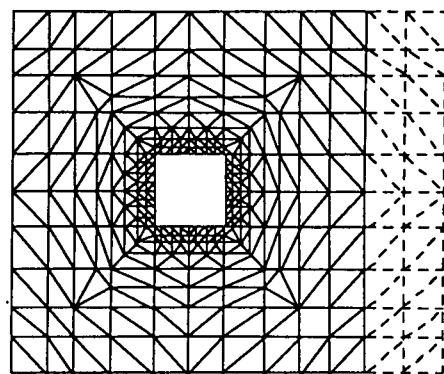


図-2 解析のモデル



--- 地下水の流動を考慮する場合の領域の拡張部分

図-3 有限要素メッシュ

表-1 計算の初期材料定数及び初期条件

物性		単位	値	物性	単位	値
土粒子の熱伝導率	λ_s	kcal/(m・s・℃)	1.12×10^{-3}	土粒子の密度	ρ_s	kg/m ³ 2650
水の熱伝導率	λ_f	kcal/(m・s・℃)	1.40×10^{-4}	水の密度	ρ_f	kg/m ³ 1000
空気の熱伝導率	λ_a	kcal/(m・s・℃)	6.10×10^{-6}	空気の密度	ρ_a	kg/m ³ 1.2
土粒子の比熱	C_s	kcal/(kg・℃)	0.2	地盤の温度	℃	10
水の比熱	C_f	kcal/(kg・℃)	1.0	地表面の温度	℃	10
空気の比熱	C_a	kcal/(kg・℃)	0.24	地下空間の温度	℃	20
水と土粒子の熱伝達係数	α_{fs}	kcal/(m ² ・s・℃)	0.2	水の熱膨張係数	β	1/℃ 4.0×10 ⁻⁴
空気と土粒子の熱伝達係数	α_{as}	kcal/(m ² ・s・℃)	0.015	土粒子の比表面積	A_s	m ² /kg 39

n+1ステップの T_s^{n+1} と T_f^{n+1} を求める。地下水面上部ではnステップの T_s^n と T_f^n を熱エネルギーの収支式に代入し、n+1ステップの T_s^{n+1} と T_f^{n+1} を求める。地下水面上部と下部で求められた T_s^{n+1} 、 T_f^{n+1} 、 T_a^{n+1} から固相、液相、気相の各々への熱損失量を求め、地下空間の熱損失量 Q^{n+1} を求める。以上の計算を繰返し、所定時間ステップNまで反復計算した。各時間ステップの支配方程式において、解は反復計算によって収束させた。

3. 解析条件及び材料定数

地下水位変動に対する解析は図-2のように縦横25mの地盤領域の中に、縦横5mの地下空間が存在する場合を想定して、その領域を図-3のメッシュのように264節点、456要素に分割し解析した。また、地下水の流動に対する解析は図-2と図-3の点線領域を含めた縦25m、横30mの地盤領域を286節点、496要素に分割し解析した。用いた境界条件としては地表面の境界Aを不透水境界と不連続熱移動境界、境界B,C,Dは透水と連続熱移動境界、地下空間の壁Eは不透水境界として解析を行った。また、地下水面は不透水と連続熱移動境界として扱った。地盤の初期温度は、一般に、地下8m程度になると温度変化がほとんどなく、年間を通じて平均温度が10℃くらいであること⁶⁾から10℃に設定した。また、今回の解析では地表面の初期温度も10℃とし、地下空間の温度は20℃で一定に保っているとした。これ以外の計算に用いた初期材料定数は表-1に示

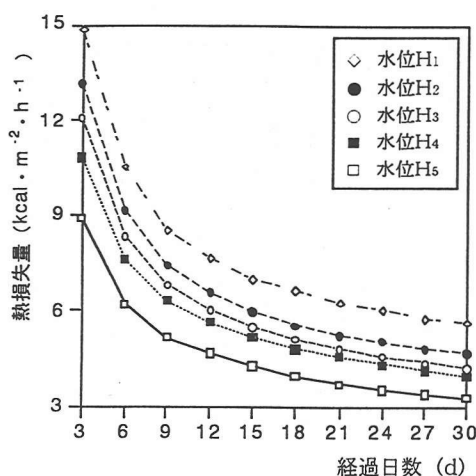


図-4 水位変動と熱損失量

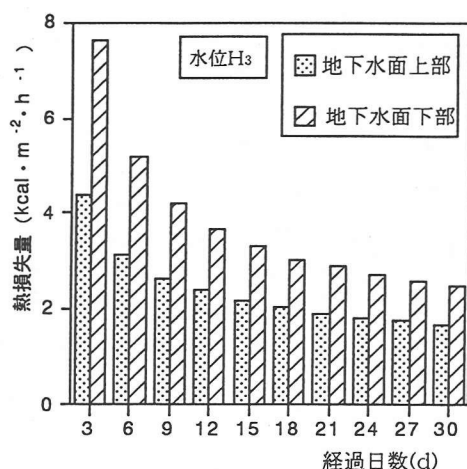


図-5 地下水面上部と下部への熱損失量

すとおりである。

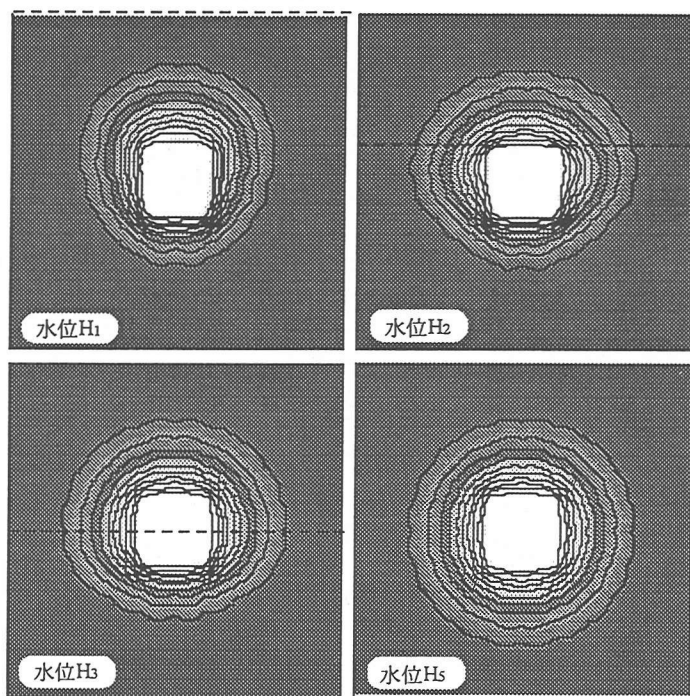
なお、計算はスキームが安定になるようにクーラン数 $C = (V \cdot \Delta t) / G^{10}$ を1より十分小さくし、時間ステップ Δt を30分に設定した。ただし、 V は最大間隙流速、 G はメッシュ中の要素の最小辺の長さである。用いたメッシュの要素の最小辺の長さは0.2mである。透水係数と間隙率の値については各解析ケース毎に後述する。

4. 解析結果

4・1 地下水位変動の影響

ここでは、地下水位変動が地下空間の熱効率に及ぼす影響について考察する。図-2に示すように、 H_1 から H_5 まで地下水位を変化させた場合の5のケースについて解析を行った。また、解析では地盤の透水係数 $1.0 \times 10^{-4} (\text{cm/s})$ 、間隙率0.33を用いた。この値は、シルトと砂が混合する地盤の物性に相当している。これ以外の条件は表-1と同じである。

図-4は経過日数毎の地下空間の単位時間・面積当たりの熱損失量の変化を表わしている。各ケースの初期の熱損失量が多いことは、初期状態では地下空間と蓄熱されてない地盤との温度勾配が大きいからであるが、日数が経過すると共に徐々に定常状態に近づく。その時間当たりの熱損失量は水位が高いほど大きい。



等温線の間隔は 1°C

図-6 経過日数30日の時の各水位別等温線
($n=0.33$, $k=1.0 \times 10^{-4} (\text{cm/s})$ の場合)

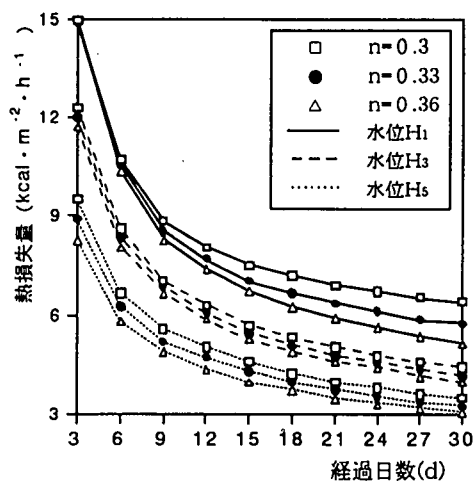


図-7 砂・シルト地盤の水位変動と熱損失量

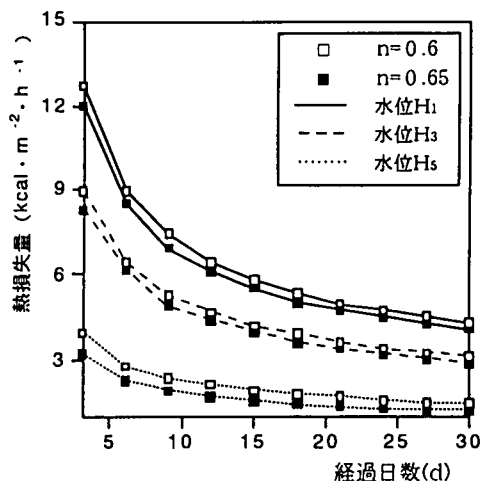


図-8 粘土地盤の水位変動と熱損失量

水位H₁の場合の単位時間・面積当たりの熱損失量は5.62(kcal · m⁻² · h⁻¹)で、水位H₃の場合の3.28に比較して約1.7倍大きいことがわかる。一方、図-6は経過日数30日における等温線を示してある。等温線の間隔は1℃であり、地下空間(20℃)から周辺地盤の初期温度(10℃)までを10等分して示した。等温線図を見ると、熱損失量とは逆に、地下水位が低いほど高温の広がり大きいことが

表-2 各相の熱容量と温度伝播率

	熱容量 $\rho \cdot c$ (kcal · m ⁻³ · °C ⁻¹)	温度伝播率 $\lambda / (\rho \cdot c)$ (m ² · h ⁻¹)
土粒子	5.00×10^2	8.06×10^{-3}
水	1.00×10^3	5.04×10^{-4}
空気	2.88×10^{-1}	7.64×10^{-1}

わかる。これは、地下空間周りに地下水が無い領域は、飽和された領域に比較して温度伝播率が大きいものの熱容量は小さいからである。すなわち、対流の影響を除いたとき、温度伝播率が同じであれば熱損失量は熱容量が大きい方が大きく、また、同じ熱容量であれば、温度伝播率が大きい方が熱損失が大きくなることになる。土粒子、水、空気の熱容量と温度伝播率を計算すると表-2のようになる。さらに、地下水がない領域と飽和された領域をそれぞれ一つの複合物質とみなした場合、間隙率を0.33として、土の平均熱伝導率をEucken¹³⁾の算定式から求めて熱容量と温度伝播率を求めると、地下水がない領域の土としての熱容量は 3.35×10^2 (kcal · m⁻³ · °C⁻¹)、温度伝播率は 7.14×10^{-3} (m² · h⁻¹)であり、飽和された領域では熱容量が 6.65×10^2 (kcal · m⁻³ · °C⁻¹)、温度伝播率が 3.885×10^{-3} (m² · h⁻¹)である。地下空間からの熱損失は地盤の温度上昇に用いられるが、地下水がない領域の温度伝播率は飽和された領域の約1.8倍であるため飽和地盤より温度上昇は早い。しかし、熱容量は飽和された領域が約2倍大きいためトータルの熱損失量は飽和された領域の方が大きくなっているのである。水位H₃の場合の地下水面上部と下部を比較してみると、図-5に示すように熱損失量は地下水面下部で大きい。図-6に示すように温度分布は地下水面上部の方が高いことが分かる。

図-7と図-8は砂・シルト地盤と粘土地盤の平均的な材料定数を用いて解析した結果である。砂・シルト地盤では透水係数を 1.0×10^{-4} (cm/s)とし、間隙率が0.3、0.33、0.36の場合について計算した。粘土地盤では、透水係数を 1.0×10^{-9} (cm/s)とし、間隙率が0.6と0.65の場合について計算を行った。粘土地盤のそれぞれの水位における熱損失量は砂・シルト地盤に比べると小さい。これは、粘土地盤と砂・シルト地盤の間隙率の違いを反映している。間隙率が大きくなると地盤の熱容量は大きくなるが、熱伝導率が高い土粒子が占める割合が少なくなることから全体としての地盤の温度伝播率は小さくなる。このため粘土地盤においての地下空間からの熱損失量は小さくなっている。

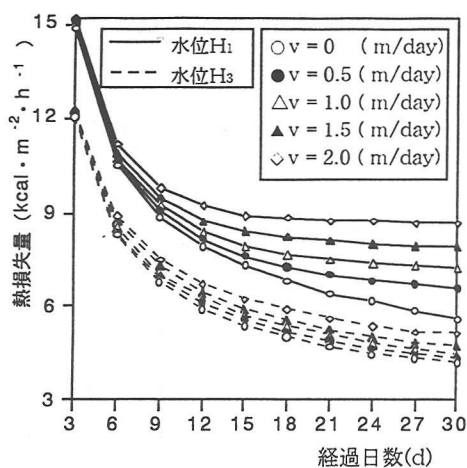


図-9 間隙流速と水位変動による熱損失量

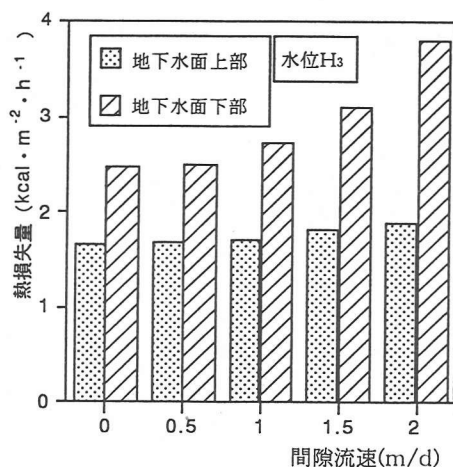
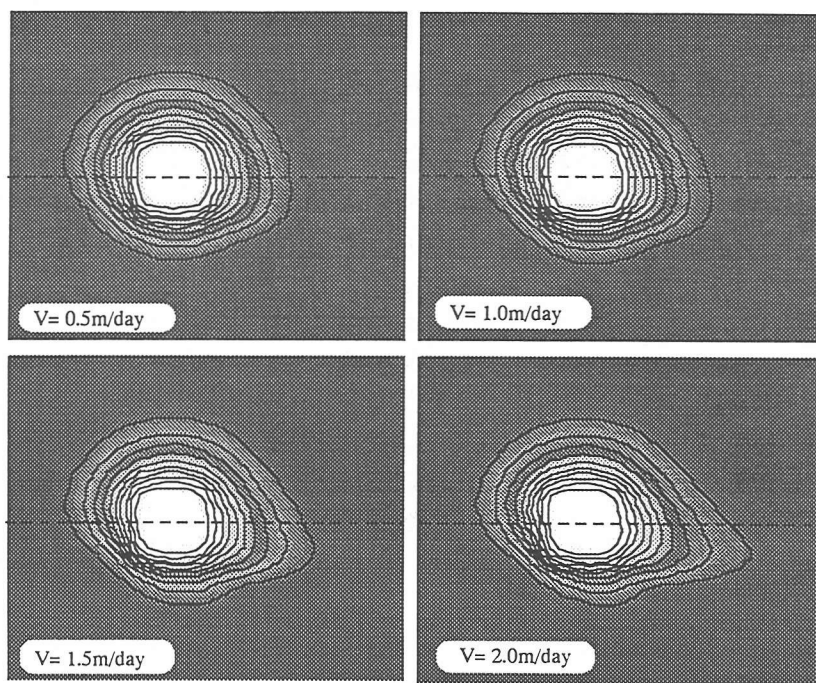


図-10 地下水面上部と下部への熱損失量 (30日)

次に図-7において、水位 H_1 の場合の間隙率の違いによる熱損失量の変化をみると、その熱損失量は経過日数が経つとともにその差が広がっている。一方、熱伝導だけに依存する熱移動は、水位 H_3 の場合に見られるようにその間隔は一定になっている。水位 H_1 の場合の間隙率の変化に従う熱損失量の差が経過日数とともに広がるのは浮力による自然対流の影響と考えられる。例えば、図-6の水位 H_1 の等温線でも、周辺地盤の上部ほど高温部が広がっており、自然対流の影響が認められる。



等温線の間隔は 1°C

図-11 経過日数30日の水位cの流速による等温線

4・2 地下水の流動の影響

(1) 間隙流速の影響

我が国の平均的な地下水の実流速は、一日に0.1から10mぐらいの値である⁸⁾が、本研究では透水係数が $1.0 \times 10^{-2}(\text{cm/s})$ の砂地盤を対象にし、地下水が0.5, 1.0, 1.5, 2.0(m/day)の流速で流れている場合についての解析を行った。そのときの動水勾配はそれぞれ0.058, 0.116, 0.174, 0.232に対応している。計算は図-2の解析

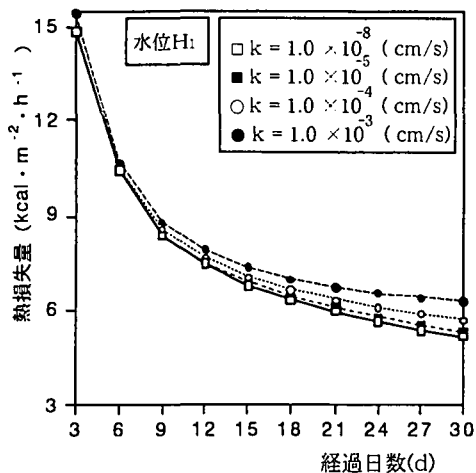


図-12 透水係数と熱損失量の変化

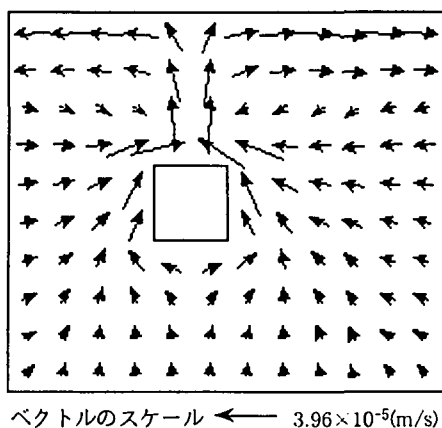


図-13 水位H₁の場合の間隙流速ベクトル

モデルの境界B,Cに境界条件として流れ関数を与え、領域中に地下水が一定の流速で境界Bから境界Cに流れる場合を計算した。

図-9は間隙流速と水位変化による熱損失量の変化を表わしている。図をみると流速が早いほど熱損失量が定常状態に近づくのが早いことがわかる。これは、地下空間周りの地下水が流れることによって地下空間と周辺地盤との間の温度勾配が保持されるからである。すなわち、地下空間からの熱によって暖められた地下水は土粒子と互いに熱伝達しながら低温領域に流される。それで、地下空間と周辺地盤との間の温度勾配は流れがない場合のそれより大きくなり、地下空間から損失される熱量は大きくなる。水位H₁において流速が2(m/day)の場合の30日経過時点での単位面積・時間当たりの熱損失量は、流速が無い場合と比較して約2.5倍であり、水位H₃でもその差は約1.2倍となっている。図-11は水位H₃の場合の流速による等温線であるが、地下水面下部で流速が早いほど下流方向に高温部が広がる。一方、図-10からわかるように地下水面上部の単位面積・時間当たりの熱損失量は地下水面下部の流速にそれほど影響されないことがわかる。

(2) 自然対流の影響

ここでは、自然対流が及ぼす熱損失量への影響を検討するため水位H₁の状態では透水係数の違いによる影響を計算した。用いた透水係数は 1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-8} (cm/s)の四つである。それ以外の条件は表-1と同じである。図-12は透水係数と地下空間の単位面積・時間当たりの熱損失量の変化を表わしている。図をみると透水係数が高いほど熱損失量は大きくなる。地下空間から熱を得た周辺の地下水は、図-13のように浮力によって上方に上昇する。経過日数30日の場合、その間隙流速は最大 3.96×10^{-5} から最小 2.31×10^{-7} (m/s)までの値になる。浮力によって上昇した温水のあとには、上昇した水より低温の水が周りから入り込む。このとき、地下空間の壁と地盤の間の温度勾配は、地下水が停滞した場合より大きくなるため、地下空間からの熱損失量は増加する。しかし、透水係数が 1.0×10^{-8} (cm/s)程度の場合は、図示していないが浮力を無視して行った計算結果とほとんど差がなかった。また、透水係数が 1.0×10^{-5} と 1.0×10^{-8} (cm/s)の場合の熱損失量の差も少ないことから、透水係数が 1.0×10^{-5} (cm/s)以下の場合には熱損失は自然対流にあまり影響されないと言える。

5. 結論

本研究では、地下空間の熱損失に影響する外的因子として地下水位変動と地下水の流れに着目し、非定常熱伝導解析によりその影響を検討した。数値解析を通じて得られた結論は以下のとおりである。

(1)地下空間の熱損失は地下水位の変動に大きく影響され、一般に、地下水位が高いほど熱損失が大きくなる。地下空間周辺の地盤が地下水で飽和された場合と地下水が無い場合では、単位面積・時間当たりの熱損失は、約1.7倍程度となることがわかった。また、間隙率が小さいほど熱損失が大きいことがわかった。

(2)地下空間の熱損失は地下水の流速が早いほど大きく、流速が2m/dayと流速が無い場合では、単位面積・時間当たりの熱損失は、約2.5倍となった。

(3)透水係数が 1.0×10^{-4} (cm/s)以下の地盤では自然対流による熱損失への影響は、ほとんど認められなかった。また、透水係数が 1.0×10^{-3} (cm/s)の場合と、透水係数が 1.0×10^{-6} (cm/s)の場合を比較すると、経過日数30日で約1.5倍の差が生じた。

以上の数値解析から、地下空間内の熱を周辺地盤に逃がしたくない場合には、地下水位を低下させることが有効であり、逆に、地下空間の熱をなるべく外に発散させるためには、地下水位をなるべく高くするとともに、地下水の流れを利用して、熱を効率的に周辺に逃がす方策が有効と考えられる。

6. 参考文献

- 1) CEN/ISO: Thermal performance of buildings-heat exchange with the ground-calculation method (draft) , (CEN/TC 89/WG 5N184), 1992. 8.
- 2) Mitalas, G.P: Calculation of below-grade residential heat loss: Low-rise residential buildings, ASHRAE Trans. , 93 Pt1, pp.743-783, 1987. 1 .
- 3) ASHRAE: 1993 ASHRAE Handbook-Fundamentals, Chapter 25, pp.9-13, 1993.
- 4)下田吉之・花井 裕・水野 稔: 地下空間における吸熱効果に関する研究, 空気調和・衛生工学論文集, No.53, pp.1-12, 1993.10.
- 5)赤坂 裕: 床面および地下壁面の暖房負荷計算法, 空気調和・衛生工学論文集, No. 7, pp.23-35, 1978.6.
- 6)土木学会編: ニューフロンティア 地下空間, 技報堂出版, pp.11-27, 1995.
- 7)柴崎達雄: 地下水盆の管理(理論と実際), 東海大学出版会, pp.19-46, 1976.
- 8)山本荘毅: 地下水水文学, 共立出版社, pp.75-87, 1992.
- 9)松本順一郎, 大久保俊治: 土の伝熱特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, pp.53-60, 1977.
- 10)林 健次・遠山 洋・二之宮 弘: パソコンによる流れ解析, 朝倉書店, pp.13-15, 1986.
- 11)Holland, F. A and Moores, R. M : 伝熱工学, 培風館, pp.16-23, 1974.
- 12)土質工学会編: 土の凍結-その制御と応用, 土質工学会, pp.41-58, 1982.
- 13)松本真一: 日射のある半地下空間の熱的特性に関する研究, 東北大学博士学位論文, pp.1-35, 1992.
- 14)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, 鹿島出版社, pp.116-145, 1976.
- 15)清水正之, 前田昌信: 流体力学の学び方, オーム社, pp.46-54, 1990.
- 16)柳沢一郎, 西尾茂文: 伝熱工学, 朝倉書店, pp.62-76, 1989.
- 17) Utsugida, Y.: Coupled analysis of flow and heat around a high-level nuclear waste repository, 5th. International Conference on Numerical Methods , Vol.1, pp.711-716, 1985.
- 18) 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, pp.13-25, 1992.