

埼玉大学 工学部

正員 佐藤 邦明

榑大林組 技術研究所

〃 西林 清茂

榑大林組 技術研究所(埼玉大学研究生)

〃 〇須藤 賢

1. はじめに

地下の伝熱問題を考える場合、従来の等温状態における飽和・不飽和浸透流のみの研究では不十分である。そこで、本研究は、熱を伴う不飽和浸透流に着目して、地盤の乾燥過程における水分移動と伝熱の現象を実験的に明らかにするための室内試験を試み、興味ある成果が得られたので、ここに報告する。

2. 実験装置と実験方法

本研究に使用した実験装置は図-1に示す。本実験は、完全に飽和させた標準砂試料の上端面に室温または温度75℃の風を送り続ける乾燥実験である。送風条件は表-1に示す。

実験方法は、気乾試料を試料モールドに均一に充填後、試料下部から水を給水し脱気により完全に試料を飽和させる。その後、定水位透水試験を行い試料の飽和透水係数を求める。その時の試料温度は23℃である。定水位透水試験終了後、試料モールド上端に風洞円筒管を設置し、冷・温風機により、所定の温度、速度の風を試料上面に送風する。

測定項目としては、試料深さ方向の温度と圧力、試料の水分量、試料全体の重量および風洞円筒管内の温度と湿度である。

3. 実験結果と考察

熱を伴う不飽和浸透流の現象に係わる係数やパラメーターは非常に多く、複雑なため、関係量および基礎方程式を提示しておく。

(1) 熱を伴う不飽和流の基礎方程式

熱を伴う不飽和流の基礎方程式は、Philipとde Vriesの理論<sup>1)</sup>に基づいたM. GeraminegadとS.K. Saxena<sup>2)</sup>によれば、次のように書かれる。

a. 熱移動の支配方程式

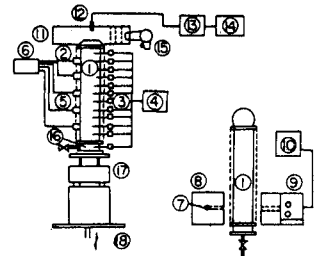
$$C_{TT} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(D_{TT} \nabla T) + \text{div}(D_{ST} \nabla S) + D_{cL} \nabla T + Q_T \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C_{TT}$ ；熱容量係数、 $D_{TT}$ ；熱伝導係数、 $D_{ST}$ ；潜熱交換係数、 $D_{cL}$ ；顕熱輸送係数、 $Q_T$ ；内的熱量発生量、 $T$ ；温度、 $S$ ；マトリックサクションである。(1)式の左辺は熱量の変化を表わし、右辺の第1項は純熱伝導、第2項は水蒸気移動による潜熱交換、第3項は顕熱輸送を表わしている。

b. 水分移動の支配方程式

$$C_{SS} \frac{\partial S}{\partial t} = \text{div}(D_{TS} \nabla T) + \text{div}(D_{SS} \nabla S) + \rho_w \frac{\partial k(\theta)}{\partial Z} + Q_S \dots \dots (2)$$

ここに、 $C_{SS}$ ；水分容量係数、 $D_{TS}$ ；熱水分拡散係数、 $D_{SS}$ ；等温水分拡散係数、 $Q_S$ ；内部発生水分量、 $k(\theta)$ ；不飽和透水係



- | 装置本体       | 中性子源と検出装置   |
|------------|-------------|
| ① 試料モールド   | ⑩ 中性子計数率表示器 |
| ② 断熱材      | ⑪ 風洞円筒管     |
| ③ 温度センサー   | ⑫ 風・湿度センサー  |
| ④ 湿度自動記録装置 | ⑬ 円上用検出器    |
| ⑤ 圧力変換器    | ⑭ 円上用記録器    |
| ⑥ 圧力測定記録装置 | ⑮ 冷・温風機     |
| ⑦ 中性子源     | ⑯ 下端水槽      |
| ⑧ 遊尺箱      | ⑰ 重量計量器     |
| ⑨ 中性子検出器   | ⑱ 昇降装置      |

図-1 実験装置の概略

表-1 送風条件

試験項目	豊浦標準砂	
	case 1	case 2
比 重	2.642	
乾燥密度(kg/m <sup>3</sup> )	1575	1575
湿潤密度(kg/m <sup>3</sup> )	1972	1979
飽和透水係数(m/s)	1.85×10 <sup>-4</sup>	1.93×10 <sup>-4</sup>
送風速度(m/s)	2.09	2.09
送風温度(℃)	26	75
送風湿度(%)	18	35

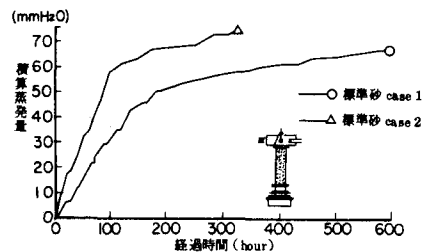


図-2 積算蒸発量の経時変化

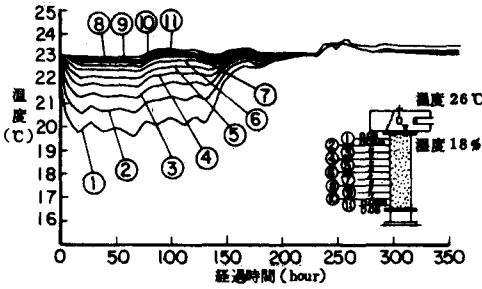


図-3 温度と経過時間の関係 (case 1)

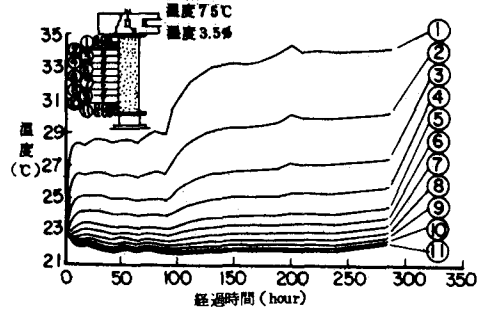


図-4 温度と経過時間の関係 (case 2)

数、 $S$ ；マトリックスサクション、 $T$ ；温度である。(2)式の左辺は水分量の変化量を表わし、右辺の第1項は温度差による水分移動、第2項はマトリックスサクションの差による水分移動、第3項は重力による水分移動を表わす。

熱を伴う不飽和流動は、上述した(1)式と(2)式のカップリング解析となる。

(2) 結果と考察

図-2は、積算蒸発量の経時変化を示したものであるが、送風温度の高いcase 2のほうで、蒸気速度は速く、蒸発量も大きい。次に、温度の経時変化についてみると、図-3の送風温度が室温の場合、試料には送風による熱量は加えられていないため、蒸発によって奪

われる熱量がそのまま温度低下に表われており、蒸発が少なくなる130時間以後からは温度が元にもどっていく。また、送風温度が75°Cの図-4の温度と経過時間をみると、深度0.25m以浅の温度は上昇し、送風温度の影響が表われており、温度が急激に変化しているのは、蒸発による気化熱の影響で、蒸発量の変化と対応している。図-5、6は、各々のcaseの体積含水率の分布を示したものであるが、体積含水率が変化している深度は、約0.25m以浅であり、毛管上昇高さが0.27m程度であることを考えると、蒸発による水分移動は毛管上昇高さの範囲で生じている。図-7は、基礎式(2)の右辺第1項、第4項と第2項のうち水蒸気移動の項を省略するとRichardsの式と同形となり、鉛直次元とした式から不飽和透水係数を求めたものであるが、従来の排水過程のもの<sup>3)</sup>と異なっている。

参考文献 1) J.R.Philip and D.A. de Vries ; Moisture Movement in porous Materials under Temperature Gradients, T. A. G. U., Vol. 38, No2, 1957.4. 2) M. Geraminegad & S. K. Saxena ; A solution of coupled heat-moisture transfer in saturated-unsaturated media, 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, PP. 567~574, 1985.4. 3) 佐藤、西林、須藤；砂質土の熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究、土木学会第40回全国大会、II-84, PP. 167~168.

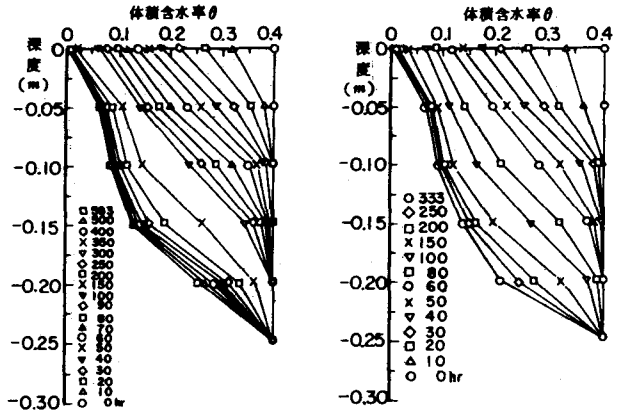


図-5  $\theta$ の分布 (case 1) 図-6  $\theta$ の分布 (case 2)

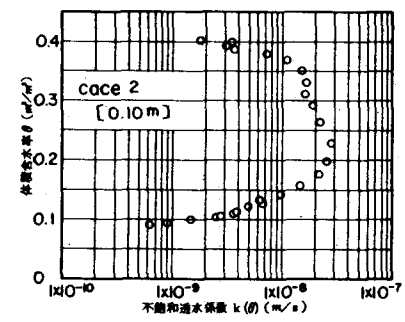


図-7  $\theta$ と $k(\theta)$ の関係 (case 2)