

## 土中におけるガスの移動特性

窒素ガス 透気 拡散

早稲田大学 学生会員 ○中谷 大樹  
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

### 1. はじめに

現在、工業や都市の発展に伴い汚染ガスによる土壌汚染が世界各地で顕在化し、汚染範囲の推定や土壌浄化工法の最適化を行う上で、土壌中のガス挙動を把握することは極めて重要である。また、汚染ガスだけでなく、地盤の液状化対策の一つである、空気注入による地盤の不飽和化などにもガス挙動の把握が必要とされている。

本研究では実験上の取扱いの容易さを考慮し、空気中に多く含まれる窒素ガスを用いて、小型モールド実験および水平カラム実験を行うことで、拡散係数および透気係数を算定し、土中での窒素ガスの移動特性を調査した。

### 2. 土中でのガスの移動現象

土中におけるガスの移動現象は、濃度差による現象と、圧力差による移流現象によって構成されている。拡散現象は Fick 則、移流現象は Darcy 則によって表わされており、それぞれ拡散係数  $D_e$  および透気係数  $k$  をパラメータとしている。図 1 のように土中をモデル化すると、窒素ガスの空気間隙内の移動は、以下の移流拡散方程式によって表される。

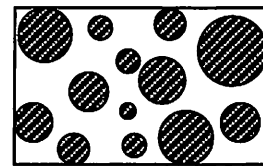


図 1 土粒子と間隙

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{n_a} \nabla \left[ \frac{k}{\mu} \cdot \{-\nabla P' - (\rho_{N_2} - \rho_{air})g \cdot C\} C \right] = \frac{D_e}{n_a} \nabla(\nabla C) \quad (1)$$

ここに、 $C$ : ガス濃度,  $n_a$ : 空気間隙率,  $k$ : 透気係数,  $\mu$ : 粘性係数,

$P'$ : 圧力差,  $\rho_{N_2}$ : 窒素ガス密度,  $\rho_{air}$ : 空気密度,  $D_e$ : 窒素ガス拡散係数

### 3. 小型モールド実験

#### (1) 実験方法

小型モールド実験では、ガスと空気に圧力差を与えない状態における窒素ガスの拡散現象に着目し、土の粒径と空気間隙率と含水比の違いによる窒素ガス拡散係数  $D_e$  の変化を調査した。

まず供試体を作製するにあたって、試料容器(内径 50mm, 高さ 100mm)に空気間隙率を調整して乾燥珪砂 2 号、3 号、4 号の 3 種類の試料を用いて作製した。また、珪砂 4 号のみ含水比も変化させた。その後、図 2 のような実験装置を用い、拡散容器に窒素ガスを充満させたのち、先ほど作製した供試体を拡散容器にはめ、供試体内に窒素を拡散させた。そして、定常状態に至るまでの容器内の酸素ガス濃度の変化を 1 分ごとに測定し、計算により窒素ガス濃度を求めた。

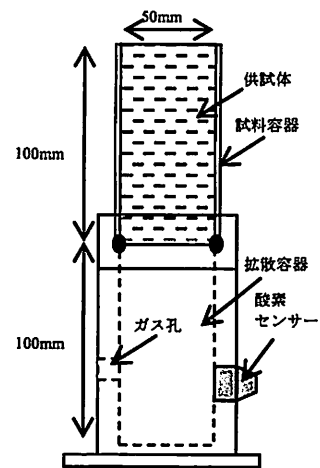


図 2 小型モールド実験装置

#### (2) 実験結果

土中における 1 次元の窒素ガスの拡散現象は Fick の法則より以下の(2)式のように表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{n_a} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2)$$

平均粒径  $D_{50}$ 、含水比  $w$ 、空気間隙率  $n_a$  と(2)式により算出した拡散係数  $D_e$  をまとめたものを右の表 1 に示す。また、この拡散係数  $D_e$  と空気中の窒素ガス拡散係数  $D_0(=0.178[\text{cm}^2/\text{s}](T=273\text{K}))$  の比  $D_e/D_0$ 、平均粒径  $D_{50}$ 、空気間隙率  $n_a$  および含水比  $w$  の関係を図 3 と図 4 に示す。これらの図からわか

表 1 窒素ガス拡散係数  $D_e$  算出結果 ( $T=273\text{K}$ )

試料	珪砂 2 号			珪砂 3 号		
平均粒径 $D_{50}[\text{mm}]$	1.9			1.4		
含水比 $w[\%]$	0			0		
空気間隙率 $n_a [-]$	0.45	0.475	0.50	0.45	0.475	0.50
拡散係数 $D_e[\text{cm}^2/\text{s}]$	0.0558	0.0583	0.0617	0.0570	0.0598	0.0622
試料	珪砂 4 号					
平均粒径 $D_{50}[\text{mm}]$	0.9					
含水比 $w[\%]$	0			2.5	5.0	7.5
空気間隙率 $n_a [-]$	0.45	0.475	0.50	0.45	0.45	0.45
拡散係数 $D_e[\text{cm}^2/\text{s}]$	0.0578	0.0612	0.0625	0.0518	0.0476	0.0464

ることは、 $D_{50}$ 、 $w$  の値が大きくなるほど、拡散係数  $D_e$  の値は小さくなる。これは、 $w$  が大きくなると、閉鎖空間ができるためである。また、 $D_{50}$  が大きくなると  $D_e$  が小さくなるのは、構造的な問題(配位数など)によるためと考えられる。また、 $n_a$  が大きくなると  $D_e$  は大きくなる。これは、窒素ガスの流路が大きくなるためである。

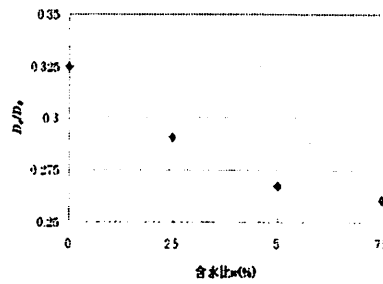


図3  $D_e/D_0$  と含水比  $w$  の関係

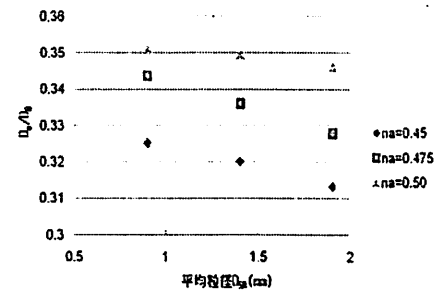


図4  $D_e/D_0$  と  $D_{50}$  の関係

4. 水平カラム実験

(1) 実験方法

水平カラム実験では、ガスの移流現象に着目し、土の状態の違いによる窒素ガス透気係数  $k$  の変化を調査した。

まず供試体を作製するにあたって、試験容器(直径50mm、長さ600mm)に空気間隙率を調節して2号、3号、4号の3種類の試料を用いて作製した。その後、図4のような実験装置を用い、供試体をカラムの両端から内側に200mmの位置になるように設置した。そして窒素ガスを流し、カラム内に窒素ガスが充満した時の、流入端と流出端の圧力を測定した。

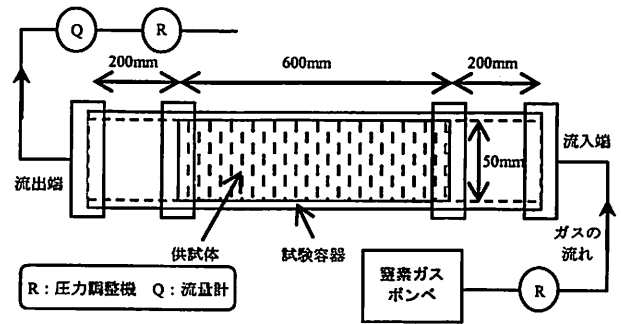


図5 水平カラム実験装置

(2) 実験結果

土中における1次元の窒素ガスの移流現象は Darcy の法則より以下の(3)式のように表すことができる。

$$\frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

$Q$ : 窒素ガス流量,  $A$ : カラム断面積,

$k$ : 窒素ガス透気係数,  $p$ : 圧力,

$\mu$ : 窒素ガス粘性係数(= $1.76 \times 10^{-5}$  [Pa · s])

平均粒径  $D_{50}$ 、空気間隙率  $n_a$  と(3)式により算出した透気係数  $k$  をまとめたものを右上の表2に示す。また、この透気係数  $k$ 、平均粒径  $D_{50}$  と空気間隙率  $n_a$  の関係を図6に示す。この図からわかることは、平均粒径  $D_{50}$  あるいは空気間隙率  $n_a$  の値が大きくなるほど、透気係数  $k$  値は大きくなる。平均粒径  $D_{50}$  が大きくなると比表面積が小さくなり、窒素ガスの流路長が短くなるためである。また空気間隙率  $n_a$  が大きくなると、窒素ガスの流路が大きくなるため、透気係数  $k$  は大きくなる。

表2 窒素ガス透気係数  $k$  算出結果

試料	珪砂2号		珪砂3号		珪砂4号	
平均粒径 $D_{50}$ [mm]	1.9		1.4		0.9	
含水比 $w$ [%]	0		0		0	
空気間隙率 $n_a$ [-]	0.45	0.475	0.45	0.475	0.45	0.475
透気係数 $k$ [cm <sup>2</sup> ]	$9.08 \times 10^{-6}$	$1.79 \times 10^{-5}$	$6.05 \times 10^{-6}$	$9.17 \times 10^{-6}$	$3.96 \times 10^{-6}$	$4.67 \times 10^{-6}$

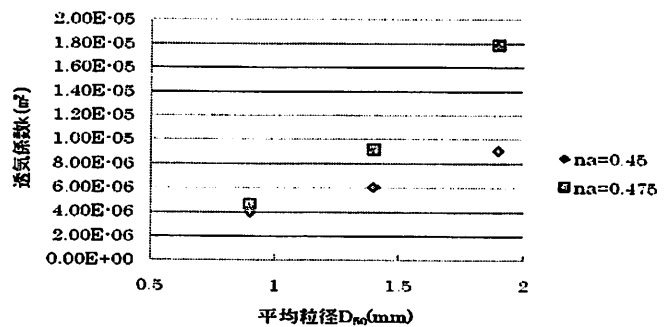


図6 実測値と推定値の関係

5. まとめ

- ・ 拡散係数  $D_e$  は平均粒径  $D_{50}$ 、含水比  $w$ 、空気間隙率  $n_a$  に依存する。  
( $w$  が大きくなると  $D_e$  は小さくなる。また、平均粒径、空気間隙率が大きくなっても  $D_e$  は小さくなる。)
- ・ 透気係数  $k$  は平均粒径  $D_{50}$ 、空気間隙率  $n_a$  に依存する。  
( $w$  が大きくなると  $k$  は大きくなる。また、空気間隙率  $n_a$  が大きくなっても  $k$  は大きくなる。)

今後は粒径を変化させた含水状態の試料での拡散試験と、含水状態の試料での透気試験を行っていく予定である。

6. 参考文献

- 1) 遅沢省子, 久保田徹: 土壌のガス拡散係数の測定法, 日本土壤肥科学雑誌, 第58巻, 第5号(1987)
- 2) 日比義彦, 藤縄克之, 岡村和夫, 田崎雅晴, 山本和明: 土壌の通気帯におけるガス成分の分散現象に関する室内実験, 土木学会論文集G, Vol.63(2007)