

土中におけるガスの移動特性の推定法について

早稲田大学大学院 学生会員 ○中谷 大樹
早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

1. はじめに

近年、地盤内におけるガスの移動現象を利用している技術として、地盤中の汚染物質を気化させ回収する土壌ガス吸引法や、地盤の液状化対策として、地盤に空気を注入し不飽和化させるという技術が検討されている。

土中におけるガスの移動特性の把握は、これらの技術の実用化に向けて必要であり、ここでは小型モールドとカラムを用いて、土中での窒素ガスの移動特性を実験的に調査した。

2. 土中でのガスの移動現象

ガスの土中における移動現象は、濃度差による拡散現象と、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 則によって表されており、それぞれ拡散係数 D_e および透気係数 k といったパラメータを用いる。

土中を **図 1** のようにモデル化すると、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。

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

C : ガス濃度, n_a : 空気間隙率, k : 透気係数, μ : 粘性係数, P' : 圧力差,

ρ_{gas} : ガス密度, ρ_{air} : 空気密度, D_e : ガス拡散係数, g : 重力加速度

3. 小型モールド実験

3.1 実験方法

小型モールド実験では、実験上取り扱いの容易な窒素ガスを用いて、窒素ガスと空気に圧力差を加えない状態における窒素ガスの拡散現象に着目し、土壌の密度と含水状態の違いによる窒素ガス拡散係数 D_e の変化を調査した。**図 2** のような実験装置を用いて、拡散容器内に充満させた窒素ガスが供試体内を拡散し、定常状態に至るまでの容器内の酸素ガス濃度変化を 1 分ごとに測定した。

供試体は、小型モールド試料容器(内径 50mm, 高さ 100mm)に **表 1** のような物性値をもつ試料を入れ、空気間隙率 n_a を 0.45, 0.475, 0.50 に、ガラスビーズは 0.40 に設定した。また、硅砂 4 号とガラスビーズ 4 号のみ含水比 w を変化させた(2.5%, 5.0%, 7.5%)実験も行い、それぞれの試料の空気間隙率 n_a は 0.40 と 0.375 とした。

なお、平均円形度は(等投影面積円の周長)/(粒子投影像の周長)で表され、1 に近い程円形である事を示す。

3.2 実験結果

圧力差 P' を加えないとき、土中における窒素ガスの 1 次の拡散現象は、以下の Fick 則で表される。

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

式(2)を解いて $T=273K$ における窒素ガス拡散係数 D_e を算出した。算出した D_e と空気中の窒素ガス拡散係数

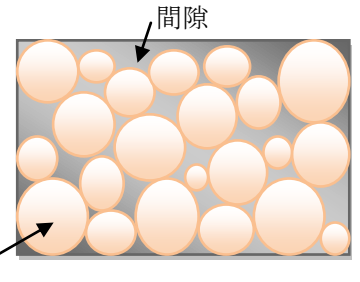


図 1 土粒子と間隙

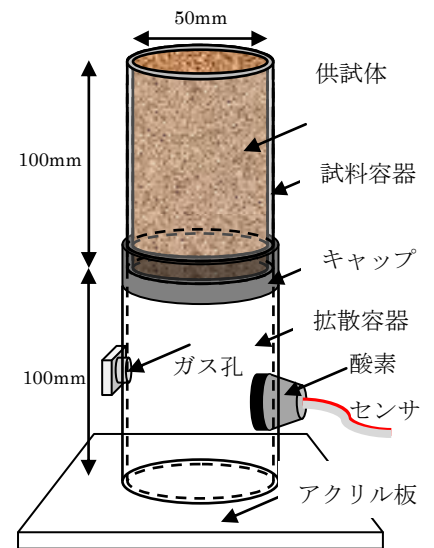


図 2 小型モールド実験装置

表 1 試料の物性

試料	平均粒径 D_{50} [mm]	平均円形度 ϕ_c [-]
硅砂 2 号	1.9	0.902
硅砂 3 号	1.4	0.913
硅砂 4 号	0.9	0.945
ガラスビーズ 2 号	2.1	1.00
ガラスビーズ 3 号	1.3	1.00
ガラスビーズ 4 号	0.95	1.00

キーワード 不飽和土 拡散 移流 小型モールド カラム

連絡先 〒169-8885 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 58 号館 205 号室 Tel:03-5286-3405

$D_0(=0.178[\text{cm}^2/\text{s}])$ の比 D_e/D_0 と各パラメータの関係図を右の図3~5に示す。図3と図4より拡散には D_{50} は関係せず ϕ_c が影響する。また、図5より n_a が大きくなると D_e/D_0 は大きくなり、逆に図6より、 w が大きくなると D_e/D_0 は小さくなる。これらの結果から D_e/D_0 の推定式を重回帰分析により求めると、以下のようになった。

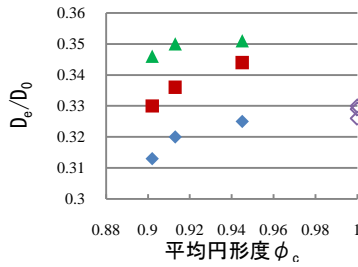


図3 D_e/D_0 と ϕ_c の関係

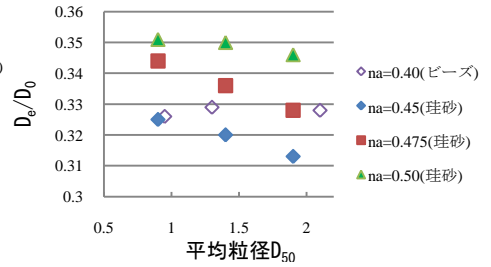


図4 D_e/D_0 と D_{50} の関係

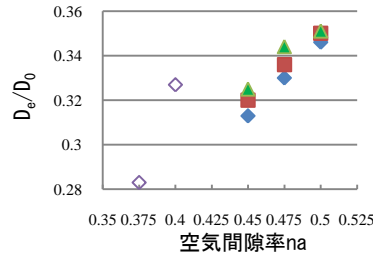


図5 D_e/D_0 と n_a の関係

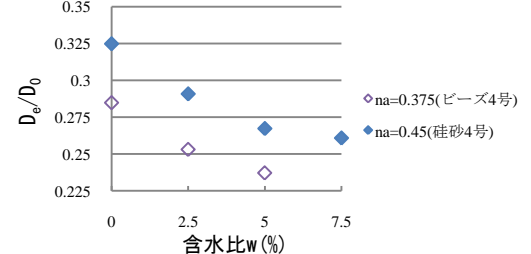


図6 D_e/D_0 と w の関係

$$\frac{D_e}{D_0} = (0.527\phi - 1.13n_a - 0.02w)n_a$$

4. 水平カラム実験

4.1 実験方法

水平カラム実験では、ガスの移流現象に着目し、土の密度と含水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。図7のような水平カラム実験装置を用いて、流出端の圧力を 0.10kPa に保った状態で窒素ガスを流量 50ml/min でカラム内に流し、カラム内が窒素ガスで満たされた時の流入端の圧力を測定した。供試体は、表1のような物性値をもつ試料を用いて、空気間隙率 n_a を変化させ、また珪砂4号のみ含水比 w を変化させた実験も行った。

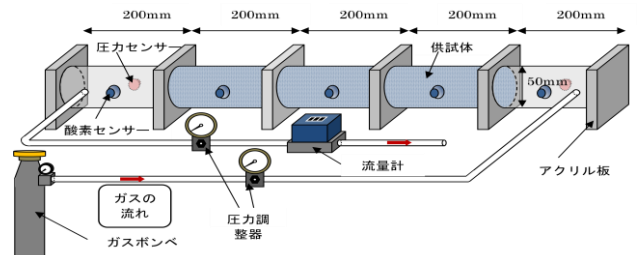


図7 水平カラム実験装置

4.2 実験結果

一次元における窒素ガス透気係数 k は、以下の Darcy 則で表せる。

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

Q :窒素ガス流量 A :カラム断面積 p :圧力 μ :粘性係数($=1.76 \times 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$)

(3)式より算出した k と各パラメータの関係図を図8~10に示す。これらの図より D_{50} と n_a および w が大きくなると k も大きくなるのがわかる。この結果から、 k の推定式を重回帰分析で求めると、以下のようになった。

$$k = \frac{1}{72} \cdot \frac{n_a^3}{(1-n_a)^2} \cdot D_{50}^2 (0.54n_a - 0.266D_{50} + 0.024w)$$

4. まとめ

- ・ 拡散係数 D_e は平均粒径 D_{50} の影響を受けず、平均円形度 ϕ_c 、空気間隙率 n_a 、含水比 w の影響を受ける。 ϕ_c あるいは n_a が大きくなると D_e も大きくなるが、 w が大きくなると 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 、含水比 w の影響を受け、各パラメータの1つの値が大きくなると k も大きくなる

参考文献：近藤智 ガスの土中での移動特性 地盤工学研究発表会 (2010)

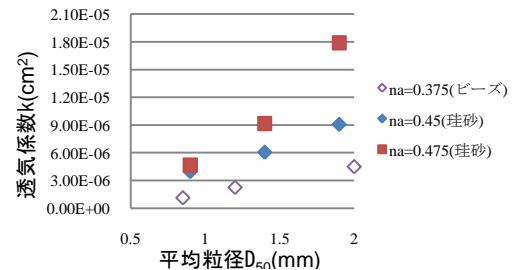


図8 k と D_{50} の関係

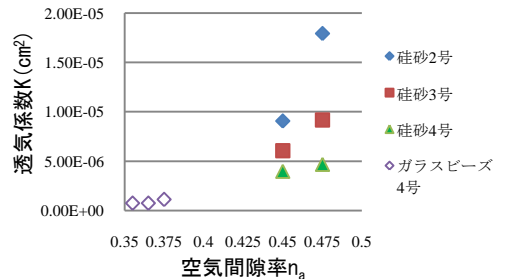


図9 k と n_a の関係

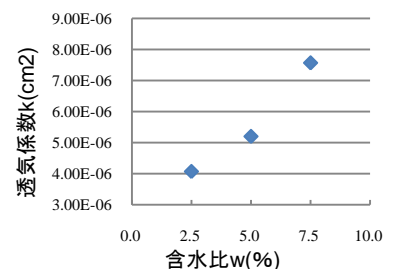


図10 k と w の関係(珪砂)