

水分拡散係数の算出に関する実験的考察

九州大学工学部 学○村山啓太

九州大学大学院 正 荒木功平

九州大学大学院 正 安福規之 大嶺聖 小林泰三 ハザリカ・ヘマンタ

1.はじめに

2010年10月19日～21日にかけての秋雨前線と台風13号の影響により、鹿児島県奄美大島で記録的な豪雨が発生した。地球温暖化による強雨化、大雨の頻度増加が現実になってきた現在、経験したことの無い災害の発生、各種産業への影響等が懸念されている。特に沖縄県では、亜熱帯特有の高温多雨の気候により、土壌侵食を受けやすく、海に流れ込む赤土等により、水産業、観光業、サンゴ等の生息環境が影響を受けており、1970年代頃から問題化している。しかしながら、昨今の行財政に制約がある現状を考えると、大型の事業対策は期待できない。

気候変動に伴う降雨の強雨化に備えるには、効率的で有用な対策が必要であり、地盤中に発生する浸透力の許容値や地盤が保有可能な水分量を適切に評価する手法が求められる。しかしながら、不飽和土の透水試験は時間がかかるうえ（数週間～数ヶ月）、技術的にも大変難しいことが知られており、容易ではない。

本論文では、不飽和透水係数を安価に短時間で求めることができるボルツマン変換法¹⁾に着目し、試験装置の試作を行う。また、体積含水率～ボルツマン変数関係を表現する関数を提案する。さらに、提案した関数から水分拡散係数を求め、豊浦砂における既往の試験結果と比較を行い、妥当性を確認する。

2. 試験概要

2-1.ボルツマン変換法

ボルツマン変換法は、土中水分の経時変化とボルツマン変数から次式により水分拡散係数を求める方法である。

$$D(\theta_x) = \frac{1}{2} \left(\frac{d\eta}{d\theta} \right)_{\theta_x} \int_{\theta_0}^{\theta_x} \eta d\theta \quad (1), \quad \eta = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

$D(\theta_x)$: 水分拡散係数, η : ボルツマン変数,

θ : 体積含水率, x : 浸潤距離, t : 給水時間

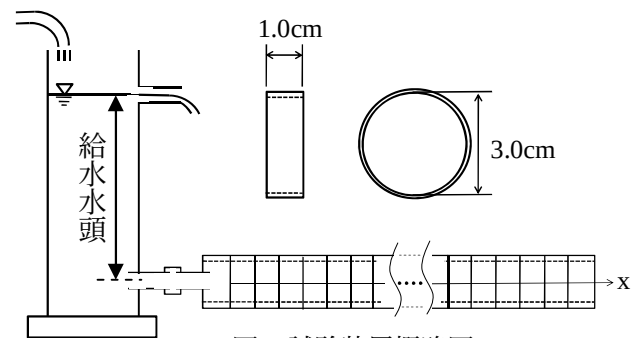


図-1 試験装置概略図

図-1に試験装置の概略図を示す。円筒リング(厚さ1 cm, 内径3 cm)を50個組み合わせた水平浸潤セルと定水位給水装置から成る。初期含水比が既知の乾いた試料をできるだけ均一に詰め、定水位給水装置から給水し、浸潤前線が所定の位置まできたら給水を止め、時間を計測し、ただちにセルを分解し、セル内の含水比を測定する。

2-2.試験条件

実験に用いた試料は豊浦砂であり、間隙比は概ね0.66とした。給水水頭を0 cm, 1 cm, 20 cmと変化させて実験を行い、給水を止める浸潤前線の位置は20 cmで統一した。

3. 体積含水率～ボルツマン変数関係の試験結果と外挿関数の提案

体積含水率～ボルツマン変数関係を表現する式(3)を提案する。式(3)の外挿関数は微分および積分が可能であり、それぞれ式(4)、式(5)のように導かれる。式(4)、(5)を式(1)に代入すると、水分拡散係数が式(6)により与えられる。

$$\eta = \frac{a}{1 + e^{(\theta-c)/b}} - \alpha \frac{\theta-c}{b} \quad (3), \quad \frac{d\eta}{d\theta} = \frac{1}{b} \left[\frac{-ae^{(\theta-c)/b}}{\{1 + e^{(\theta-c)/b}\}^2} - \alpha \right] \quad (4)$$

$$\int_{\theta_0}^{\theta_x} \eta d\theta = ab \left\{ \left(\frac{\theta_x - \theta_0}{b} + \ln \frac{1 + e^{(\theta_0-c)/b}}{1 + e^{(\theta_x-c)/b}} \right) \right\} - \frac{\alpha}{b} \left\{ \theta_x \left(\frac{\theta_x}{2} - c \right) - \theta_0 \left(\frac{\theta_0}{2} - c \right) \right\} \quad (5)$$

$$D(\theta_x) = \frac{-1}{2b} \left[\frac{-ae^{(\theta_x-c)/b}}{\{1 + e^{(\theta_x-c)/b}\}^2} - \alpha \right] \left[ab \left\{ \left(\frac{\theta_x - \theta_0}{b} + \ln \frac{1 + e^{(\theta_0-c)/b}}{1 + e^{(\theta_x-c)/b}} \right) \right\} - \frac{\alpha}{b} \left\{ \theta_x \left(\frac{\theta_x}{2} - c \right) - \theta_0 \left(\frac{\theta_0}{2} - c \right) \right\} \right] \quad (6)$$

a, b, c, α : フィッティングパラメータ, θ_0 : 初期体積含水率(炉乾燥砂を用い 0% とした。)

表-1 にフィッティングパラメータの値および図-2 にボルツマン変換法による実験結果と外挿関数を用いた回帰曲線を示している。また, 図中 t は浸潤前線位置 20cm に達した時間である。なお, a は, ボルツマン変数～体積含水率関係における傾きが大きく変わる点のボルツマン変数を表す。 b, c, α は回帰分析を行って決定した。

表-1 より, a は給水水頭に依存し, c は給水水頭に依存しないことがわかった。 b, α は, 給水水頭が 0cm と 20cm ではほぼ同様の値が得られた。

図-2 より, 式(3)を用いて試験結果を表現できることがわかる。ボルツマン変数の値を見ると, 給水水頭が大きいほうがボルツマン変数の値も大きくなっている。

4.水分拡散係数の算出結果と考察

図-3 に, 式(6)により算出された水分拡散係数と体積含水率の関係を示す。給水水頭を変化させた 3 ケース (0 cm, 1 cm, 20cm) の結果を比較したところ, ほぼ同じような値が得られた。図-2 では, 給水水頭の違いにより体積含水率～ボルツマン変数関係が変化することがわかったが, 図-3 から水分拡散係数は, 給水水頭依存性は小さいことがわかった。また, 杉井ら²⁾の実験による豊浦砂の水分拡散係数～体積含水率関係をプロットした。杉井らの実験結果に比べ, 本論文による水分拡散係数は小さめに評価された。傾向としては同様な結果が得られたため, 試作した試験装置は妥当なものと判断しているが, 杉井らの実験結果との違いは, 間隙比の違いによるものと考えている。

5.まとめ

本論文では, 体積含水率～ボルツマン変数関係を求めるための試験装置を試作した。また, 体積含水率～ボルツマン変数関係の関数化を行い, 水分拡散係数を算出した。その結果, 水分拡散係数の給水水頭依存性は小さいことがわかった。算出した水分拡散係数と既往の研究を比較すると, 良好な関係を得ることができ, 試作した試験装置の妥当性を確認した。

今後は, 給水を止める浸潤前線位置の依存性の検討, および間隙比依存性を検討する。また, 試料土に沖縄県の赤土を用いた実験を行いたい。さらに, 保水性試験を行い, 比水分容量を算出し, 不飽和透水係数を算出した。最終的には降雨による土砂流出量を求めることを予定している。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 「不飽和地盤の挙動と評価」, 地盤工学会, pp63-65, 2004
 - 2) 杉井俊夫, 坂本幸一, 下村尚士: 新たな水分拡散係数の計測法の提案, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1227-1228, 2006 年 7 月
- 謝辞: 本研究(の一部)は, 環境省の環境研究総合推進費(S8-2(2))の支援により実施された。

表-1 フィッティングパラメータ

給水水頭(cm)	a	b	c	α
0	4.33	0.0114	0.432	0.0267
1	5.56	0.00433	0.429	0.0122
20	9.06	0.0102	0.438	0.0245

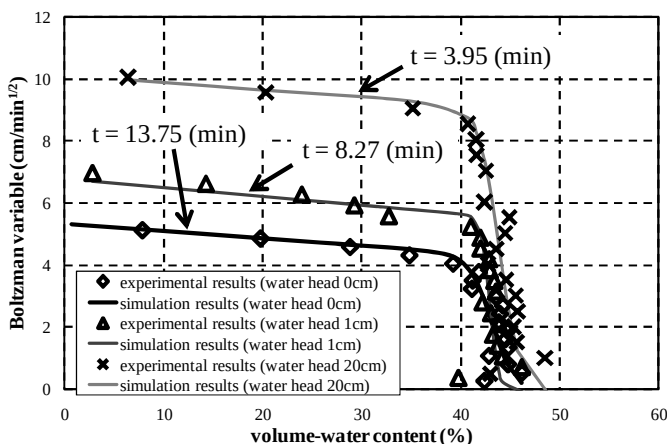


図-2 給水水頭を変化させた場合のボルツマン変数～体積含水率関係

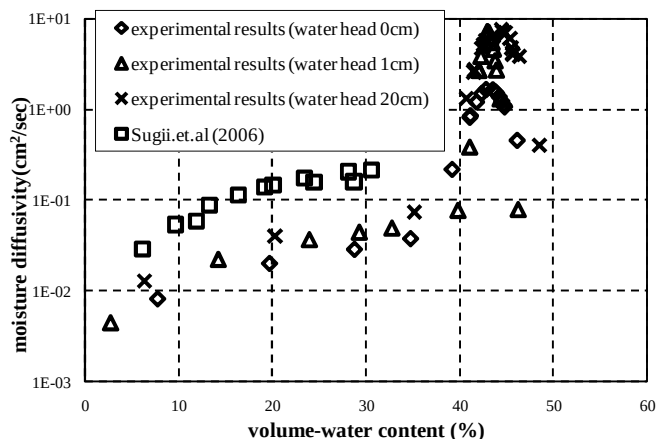


図-3 給水水頭を変化させた場合の水分拡散係数