

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06213

研究課題名(和文) 室内土槽・水槽試験による不飽和土の蒸発効率の水分依存性に関する考察と数値モデル化

研究課題名(英文) Considerations on the moisture dependence of evaporation efficiency in unsaturated soil using laboratory test results and water tank tests, and a proposal of a concept model for evaporation parameter

研究代表者

酒匂 一成 (SAKO, Kazunari)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：20388143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、降雨後の通行・運行規制の解除のため、降雨後の斜面表層からの蒸発量に着目した。蒸発量の現地モニタリング手法としてバルク法を用い、室内土槽試験結果を基に不飽和砂質土の蒸発効率の特徴について考察を行った。交換速度および蒸発効率の算定方法について、東北大学の近藤らの交換速度の算定方法を参考にしつつ、従来とは異なる地表面の熱容量を考慮した交換速度を提案した。また、提案する交換速度を用いた蒸発効率の算定を行い、従来の方法との違いについて考察した。また、蓄積したデータから、研究代表者らが提案する不飽和土の浸透挙動に関する概念モデルから、蒸発効率算定に必要なパラメータのモデル化を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, the relationships between volumetric water content and evaporation efficiency of unsaturated sandy soil were discussed based on experimental results. Firstly, the improved experiment method for the moisture exchange speed was proposed, the evaporation efficiency of unsaturated soil were obtained. The characteristics of evaporation efficiency were detail explained. Comparing with the conventional experimental method proposed by Kondo et al. and our proposed experimental method, the effect of the volumetric heat capacity for evaporation efficiency could be observed. A concept model for evaporation efficiency was also proposed. The parameter for evaporation efficiency can be derived from the proposed model using the grain size distribution and void ration. Then, the validity of the concept model was checked comparing with calculation results and experimental results. Finally, the improvements of the concept model were discussed.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 蒸発効率 斜面安定

1 . 研究開始当初の背景

降雨時の土砂災害に対する防災システムにおいて、主に降雨量に基づいた指標を用いて住民の避難や交通・運行規制などが判断されている。一方で、降雨後の規制の解除に関しては、具体的な判断方法は無い。研究代表者ら¹⁾は、降雨時の表層滑り型崩壊に対して、斜面内の水分変動に着目した現地モニタリングと数値シミュレーション（不飽和浸透解析と斜面安定解析）による斜面防災システムの構築に取り組んできており、降雨後の斜面内の水分変動の計測や数値シミュレーションにより、規制解除のタイミングを定量的に評価したいと考えている。そこで重要となるのが、降雨後の斜面表層からの蒸発量の現地モニタリング方法である。蒸発量の現地モニタリングを行う手法として、一般的な気象観測データから蒸発量の推定が可能となるバルク法²⁾を用いることとした。バルク法において、地表面の土の状態によって影響されるパラメータに、交換速度 g_a および蒸発効率 β がある。特に、蒸発効率 β については、表層土の体積含水率や間隙径などに大きく影響されると言われている³⁾。この蒸発効率 β の水分依存性を把握し、それに関する概念モデルを提案することができれば、一般的な気象観測データから蒸発量を推定し、その結果を不飽和浸透解析の境界条件として用いて降雨後の斜面安定性評価を定量的に評価でき、避難や交通・運行規制の解除の判断材料を提供できると思われる。

2 . 研究の目的

本研究課題では、一般的な気象観測データから蒸発量を推定できるバルク法を用い、そのパラメータの一つである蒸発効率 β について着目する。種類の異なる土質材料や締固め具合（間隙比）の違いにおける蒸発効率の水分依存性（体積含水率～蒸発効率の関係）について、土槽・水槽試験で明らかにし、土質力学的観点から考察を行う。また、確率・統計を援用した数値力学モデルによる、体積含水率～蒸発効率の関係のモデル化を行う。なお、地表面からの蒸発量は、蒸散の検討が必要であるが、本課題では、裸地地盤の蒸発特性を対象とする。

3 . 研究の方法

本研究では、主に以下の2つの項目について取り組んだ。

(1) 体積含水率～蒸発効率関係についての室内土槽・水槽試験

近藤ら³⁾の蒸発効率算定手法を参考に、研究代表者および分担者らが提案した室内土槽・水槽試験を用いた試験を実施した。体積含水率～蒸発効率の関係を土質力学的観点から考察するために、土の基本的な物理量を管理した供試体作成を行い、試験を行った。今回の試験では、裸地地盤の蒸発特性を対象

とした。

(2) 確率・統計を援用した概念モデルの提案と妥当性評価

土の基本的な物理量（間隙比、粒度、土粒子の密度）から体積含水率～蒸発効率の関係を推定することのできる確率・統計を援用した概念モデルの提案に取り組んだ。一般に、体積含水率が低い場合、蒸発効率 β は低下している。これは、土中で蒸発した水が水蒸気となって間隙部分を通って大気中に出るため、地表面付近に間隙水がある場合よりも蒸発効率が落ちることを意味している（水面からの蒸発量と同じ場合、蒸発効率は $\beta=1.0$ となる）。そこで、これまでに研究代表者らが提案してきたモデル⁴⁾を基礎に概念モデルを提案した。また、室内土槽・水槽試験の結果との比較から、モデルの妥当性評価および改良を行った。

4 . 研究成果

本章では、まず、交換速度と蒸発効率の算定方法の概要を述べる。また、砂質土の体積含水率と蒸発効率の関係について、近藤らの提案する蒸発効率の算定方法と著者らの提案する手法を検討し、不飽和土中の水分状態と蒸発効率の関係について、考察する。次に、初期間隙比を考慮した不飽和土中の水分状態と蒸発効率の関係、また、土試料の種類の違いによる不飽和土中の水分状態と蒸発効率の関係について考察を行う。そして、不飽和土中の水分状態と蒸発効率の関係の算定結果をもとに、蒸発量推定パラメータである $F(\theta)$ の水分依存性についてまとめる。

(1) 体積含水率～蒸発効率関係についての室内土槽・水槽試験

室内土槽・水槽試験の概要

まず、単位面積当たりの蒸発量を表すバルク式を次式に表す。

$$E = \rho \times \beta \times g_a \times (q_{SAT} - q_a) \quad (1)$$

バルク法を用いる際、未知パラメータ（交換速度 g_a と蒸発効率 β ）は事前に求めておく必要があるが、1 高度の気象観測データで蒸発量を求めることができる。蒸発効率 β は地表面からの蒸発のしにくさを表すパラメータであり、土の飽和度に対して 0～1 の値をとる。飽和度 $S_r=0\%$ の時は $\beta=0$ 、飽和度 $S_r=100\%$ の時は $\beta=1$ となる。

図-1 に実験の概要を示す。実験は、気象観測装置、土槽実験用装置（土槽＋電子天秤）と水槽実験用装置（水槽＋電子天秤）で主に構成されている。図-2 に交換速度と蒸発効率の算定フローを示す。まず、土槽実験、水槽実験、気象観測を同時に行う。気象観測と水槽実験で得られた結果より水面における交換速度 g_a を算出する。また、土槽実験で得られた結果と求めた交換速度 g_a より蒸発効率 β を求める。

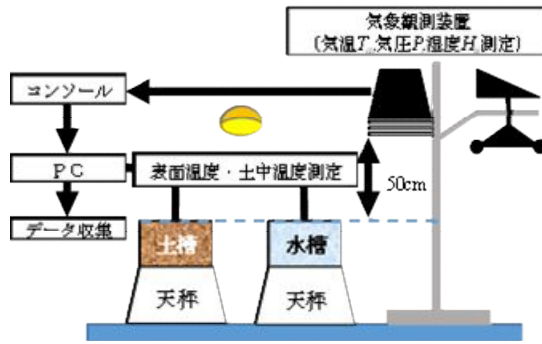


図-1 試験土層模式図

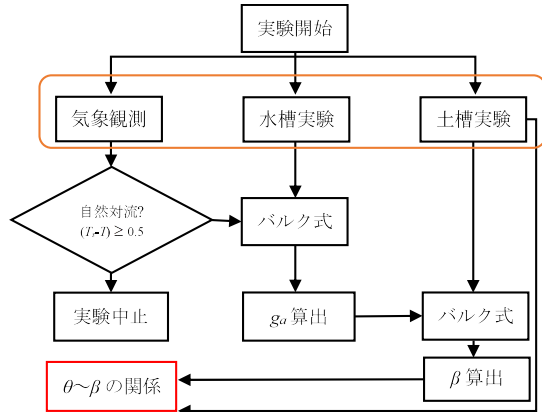


図-2 蒸発効率の算定方法の概要

初期飽和度の異なる供試体の試験結果

試料として豊浦砂を用い、内径 15.5cm、外径 16.5cm、高さ 2cm の塩化ビニール製円筒容器に初期間隙比 $e_0=0.785$ と設定し締め固めた。水槽と土槽の表面、また土槽の表面から 1cm の深さにそれぞれ熱電対を設置した。体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を求めるため、飽和度 10, 20, 40, 60, 80% に相当する 5 ケースの体積含水率を初期値として設定し、それぞれ複数回実験を行なった。計測間隔を 15 分とし、計測開始後 1200 分 (約 1 日) 経過したときに試験を終了とした。また、自然対流状態を起こすために、電気スタンド (200W) を使用し、強制的に自然対流状態を起こし、試験を行なった。

図-3 に体積含水率 θ と蒸発効率 β の算定結果を示す。また、Kondo ら³⁾が提案する体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係の砂に関するモデル (式(2)) の値も図示されている。

$$\beta = \frac{1}{1 + C_H U \cdot F(\theta) / D_{atm}} \quad (2)$$

ここに、 $F(\theta)$: 土壌間隙の奥から地表面までの水蒸気の流れに対する距離[m], D_{atm} : 水蒸気の分子拡散係数。

図-3 における「I」蒸発効率 $\beta > 1$ である部分、「II」蒸発効率 $\beta = 1$ である部分、「III」蒸発効率 $\beta < 1$ である部分に着目して、考察を行う。I の部分は、試験開始直後の土槽と水槽の表面の暖まりやすさの差を示し、II の部分は土槽からの蒸発量と水槽からの蒸発量がほぼ一致している時点での蒸発効率を示

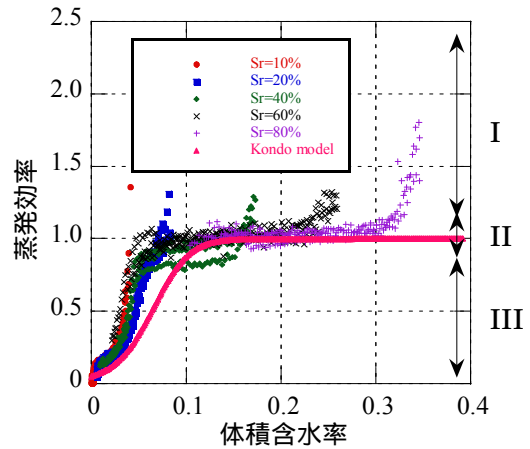


図-3 体積含水率～蒸発効率の関係 (初期飽和度の違い, 豊浦砂)

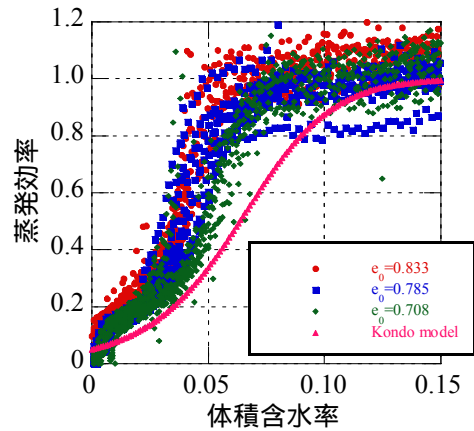


図-4 体積含水率～蒸発効率の関係 (初期間隙比の違い, 図-5 を拡大)

している。また、III の部分は、II の状態からさらに時間が経過した際、土の間隙中から水が蒸発するようになるため、土の間隙構造などの影響で蒸発効率が低下すると考えられる。

初期間隙比の異なる供試体の試験結果

蒸発効率 $\beta < 1$ の算定値を示す部分に対して、間隙径の違いにより、蒸発効率の算定値に影響が出ると考えられる。そこで、室内土槽実験における初期間隙比を $e_0=0.833, 0.785, 0.708$ の 3 ケース設定し、試験を行なった。図-4 に、初期間隙比を変えて算定した 3 ケースの体積含水率と蒸発効率の算定結果と式(2)の算定値を図示したものを示す。図-4 より、3 ケースの体積含水率と蒸発効率の算定結果では、蒸発効率の算定結果にばらつきがみられた。原因として、地表面と水表面の暖まりやすさの差が、交換速度 g_a の算定値に影響を与えたことが考えられる。また、初期間隙比が小さい土槽 (密な土槽) では、体積含水率が大きいときに蒸発効率 $\beta < 1$ となっている。これは、初期間隙比の小さい土槽では、土中の間隙が小さく複雑であるため、土中の含水

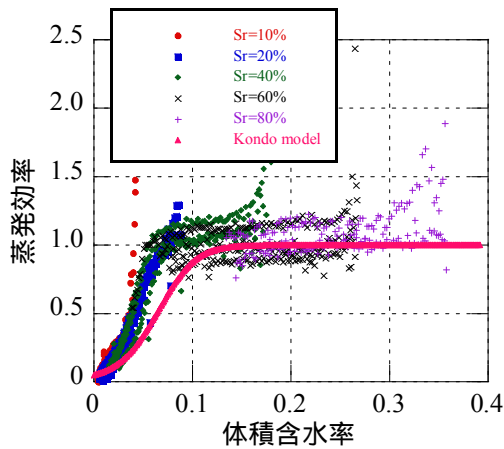


図-5 体積含水率～蒸発効率の関係
(初期飽和度の違い, まさ土)

量が大きい場合でも蒸発しにくいと考えられる。

供試体の試料が異なる場合の試験結果
バルク式に用いる蒸発効率 β は土の種類にも影響を受けると考えられる。そこで、実験試料として宮之城産まさ土を用い、相対密度を50% (初期間隙比 $e_0=0.814$)と設定し、試験を行なった。

図-5には、まさ土を用いた室内土槽・水槽実験結果から得られた体積含水率と蒸発効率の算定結果と式(2)の算定値を示す。図-6に、豊浦砂 (初期間隙比 $e_0=0.785$)とまさ土のそれぞれの室内土槽・水槽試験で算定した体積含水率と蒸発効率の算定結果について、蒸発効率 $\beta < 1$ の算定値を拡大した図を示す。また、豊浦砂とまさ土の粒径加積曲線を図-7に示す。まさ土の試験結果によると、土槽からの蒸発量が水槽からの蒸発量よりも長時間大きくなっている傾向が見られ、豊浦砂よりも長かった。これは、豊浦砂よりもまさ土のほうが暖まりやすいということを示している。図-6より、蒸発効率 $\beta < 1$ の部分に着目すると、初期間隙比の小さい豊浦砂の方が、

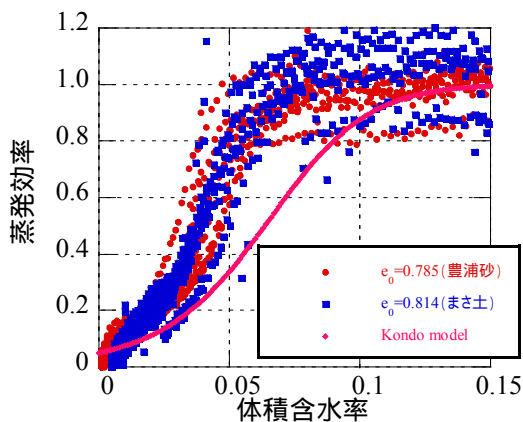


図-6 体積含水率～蒸発効率の関係
(豊浦砂とまさ土)

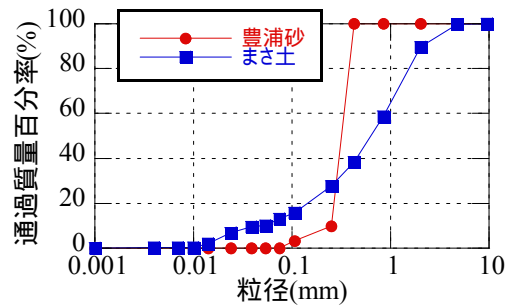


図-7 粒径加積曲線

含水量が大きい部分で蒸発効率 $\beta < 1$ となっている。図-7より、豊浦砂とまさ土では粒度の違いがあるが、体積含水率と蒸発効率の関係の試験値への影響はあまり見られなかった。さらなるデータを蓄積する必要がある。

蒸発量推定パラメータ $F(\theta)$ による検討

間隙比、また実験試料を変えた室内土槽・水槽試験で算定した体積含水率と蒸発効率の関係には、算定値にばらつきがみられた。これは、温度による交換速度 g_a のばらつきが原因として考えられるが、この地表面と水表面の暖まりやすさの差による交換速度 g_a への影響を軽減するために、蒸発量推定パラメータ $F(\theta)$ を用いて算定することにした。 $F(\theta)$ は、土壌間隙の奥から地表面までの水蒸気の流れに対する距離[m]を示す。土中の含水量が大きい時は、地表面の大きな間隙に水が存在し、そこから水分が蒸発するため、 $F(\theta) = 0$ となるが、含水量が小さくなると土中の間隙内に水が点在するようになり、水蒸気が地表面に達するまでに通過する間隙の距離が長くなるため、 $F(\theta)$ は大きくなる⁵⁾。室内土槽・水槽試験結果を用いて、 $F(\theta)$ の算定を行う。図-9に初期間隙比を変えた室内土槽・水槽実験結果から算定した体積含水率と $F(\theta)$ の関係、図-10に豊浦砂 (初期間隙比 $e_0=0.785$)とまさ土の室内土槽・水槽実験結果から算定した体積含水率と $F(\theta)$ の関係を示す。図-8、図-9ともに地表面と水表面の暖まりやすさによ

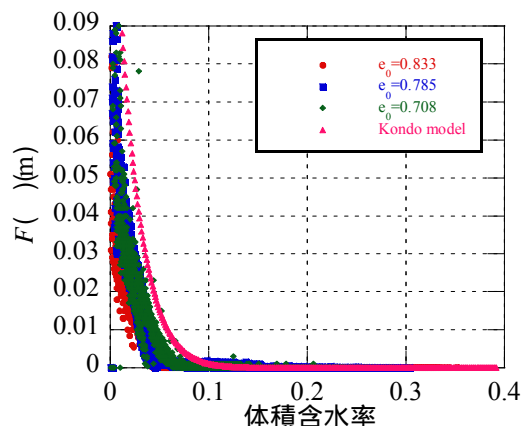


図-8 体積含水率～ $F(\theta)$ 関係
(初期間隙比の違い)

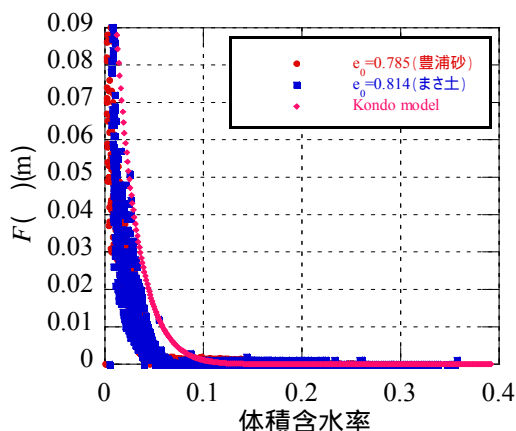


図-9 体積含水率～ $F(\theta)$ 関係
(豊浦砂とまさ土)

る交換速度 g_a への影響を軽減することができ、ばらつきの少ない算定値を得ることができた。図-8より、初期間隙比が小さい土槽では、体積含水率が大きい時点で $F(\theta)$ は大きくなるのが分かる。これは、初期間隙比の小さい土槽では、土中の空隙が小さく複雑であるため、蒸発する際に水蒸気が通過する空隙の距離が長いことを示している。また、図-9では、図-7に示すように粒度の違いはあるが、今回材料による体積含水率と $F(\theta)$ の関係への影響はあまり見られなかった。今後、検討が必要である。

まとめ

本節では、バルク法で用いられる蒸発効率 β の体積含水率、空隙比、表層土の種類等の影響を検討するため、初期間隙比、供試体の試料を変えた室内土槽・水槽試験を行った。試験により得られた知見を以下に示す。

- ・Kondo modelと提案する手法のそれぞれで算定した土槽表面における蒸発効率について、地表面の暖まりやすさや含水状態との関係を明確に考察できた。
- ・蒸発効率 $\beta < 1$ 部分では、初期間隙比によって、不飽和土中の含水状態と蒸発効率との関係、また $F(\theta)$ との関係に影響があるということを示すことができた。
- ・交換速度 g_a の温度によるばらつきを $F(\theta)$ で考慮することで、温度による影響を軽減できた。

本節でまとめた結果を得るにあたり、森岩寛稀君(元鹿児島大学大学院)の協力を得た。ここに謝意を示す。

(2) 確率・統計を援用した概念モデルの提案と妥当性評価

$F(W_v)$ を推定するための概念モデルの概要
概念モデルを提案するにあたり、モデルのパラメータ表示の都合上、前節で $F(\theta)$ を以降 $F(W_v)$ と表記する。空隙モデルは、不飽和土中の空隙水の浸透挙動を計算するための数値力

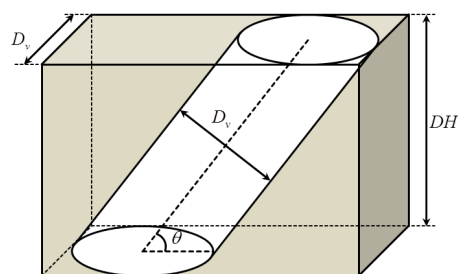


図-10 モデル化した一要素(素体積)

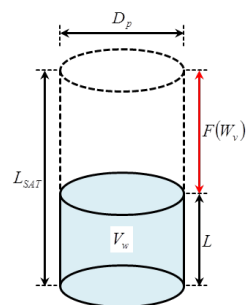


図-11 空隙体積のモデル化

学モデルであり、土塊の微小要素における空隙部分を円管、土粒子実質部分を円管以外の不透水性の固体にモデル化している。図-10に示すモデル化した一要素を素体積と称す。空隙モデルでは、管径 D_v と円管の傾き θ を確率変数とみなし、それらの確率密度関数を求めて、空隙の不規則な構造を評価している。 $F(W_v)$ は長さの単位であることから、単位体積の最表層土内の空隙水の体積を直径 D_v の円管に置き換え、円管の長さを用いて $F(W_v)$ を算定するモデルを提案する。図-11に示すように、飽和時の円管の長さを L_{SAT} 、不飽和時の円管の長さを L と定義し、水が空隙中の水面から蒸発することを考慮して、 L_{SAT} と L の差を $F(W_v)$ と定義し、次式に示す。

$$F(W_v) = L_{SAT} - L = \left\{ \frac{e}{1+e} (1 - S_r) \right\} \bigg/ \left(\frac{D_p^2}{4} \pi \right) \quad (3)$$

ここに、 e : 空隙比, S_r : 飽和度。

計算結果

モデル円管の直径 D_p を以下の3つのCaseで仮定し、空隙比 $e=0.785$ の豊浦砂を試料として $F(W_v)$ の算定を行った。

- Case.1 : 水分を保持している円管の最大管径 d を用いる。
- Case.2 : 範囲 $0 \sim d$ における管径 D_v の平均値を用いる。
- Case.3 : 範囲 $0 \sim d$ における管径 D_v と確率の積の総和を用いる。

しかし、モデルによる算定結果が室内試験における算定結果を大きく上回る値となったため、モデルが単位体積の最表層土内の空隙水の体積を基に考えていることが原因であると考えられたことから、モデルの補正を行った。

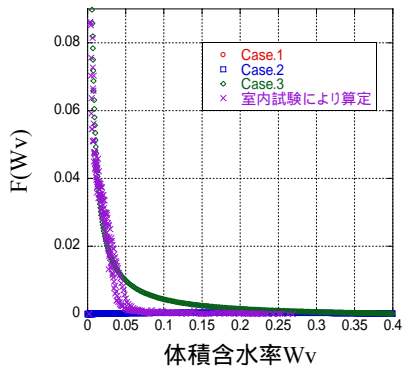


図-12 補正後の算定結果

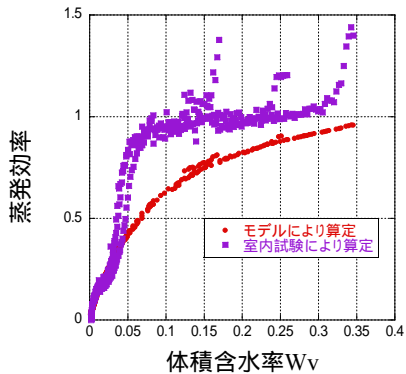


図-13 概念モデルによる蒸発効率の推定

モデルを 1 つの要素体積に置き換えるため、最表層土と 1 つの要素体積の体積比を用いて補正した。補正に用いた係数を式(4)に示す。

$$A = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} V_e \cdot P_d(D_v) \cdot P_c(\theta) d\theta dD_v \quad (4)$$

ここに、 V_e ：素体積の体積、 $P_d(D_v)$ ：管径 D_v の確率密度関数、 $P_c(\theta)$ ：円管の傾き θ の確率密度関数、 d ：水分を保持している円管の最大管径。

図-12 より、補正した結果、Case.3 の算定結果が室内試験による算定結果に最も近い値となった。この結果より、本研究では Case.3 を採用した。

蒸発効率の水分依存性の推定

室内試験により算定した交換速度 g_a と水蒸気の分子拡散係数 D_{atm} 、モデルにより算定した $F(W_v)$ を用いて、蒸発効率 β の算定を行った。図-13 にモデルによる算定結果と室内試験による算定結果を示す。0.04 以降の範囲の体積含水率 W_v において算定結果に差が生じている。これは、モデルが体積含水率 $W_v=0.05$ までにおける $F(W_v)$ の急激な減少を十分に評価できていないことが原因であると考えられる。

まとめ

今回提案したモデルでは、体積含水率 $W_v=0.05$ までにおける $F(W_v)$ の急激な減少を十分に評価できなかったため、今後は室内土

槽試験データの蓄積とモデルの改良を行っていく必要がある。

今回提案した概念モデルを用いることで、地盤の蒸発効率の水分依存性を推定し、一般的な気象データを用いて蒸発量を推定することが可能となる。

本節の研究は、軸屋雄太君(元鹿児島大学)の協力を得た。ここに謝意を示す。

<引用文献>

- 1) 酒匂一成, 里見知昭, 菅野智之, 深川良一, 安川郁夫: 降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの確立に関する研究, 歴史都市防災論文集, Vol.1, pp.164-174, 2007.
- 2) 近藤純正: 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, pp.194-198, 1994.
- 3) J. Kondo, N. Saigusa and T. Sato: A parameterization of evaporation from bare soil surfaces, J. Appl. Meteor, Vol.29, pp. 385-389, 1990.
- 4) K. Sako, R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006 年.
- 5) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.196-197, 1994.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- 1) K. Sako, M. Moriwa, T. Satomi: Experimental Consideration of Evaporation Efficiency β of Unsaturated Sandy Soil Surface, Proc. of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, No.JPN-29, 2015.
- 2) R. Kitamura, K. Sako: Inter-Particle Stress used in Kitamura & Sako's Unsaturated Soil Mechanics, Proc. of the 16th Conference on Current Researches in Geotechnical Engineering in Taiwan, Paper No.H13 (CD), 2015.

〔学会発表〕(計 1 件)

- 1) 森岩寛稀, 酒匂一成: まさ土の蒸発効率 β の水分依存性に関する一考察, 平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.409-410, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒匂 一成 (SAKO, Kazunari)
鹿児島大学・理工学域工学系・准教授
研究者番号: 20388143

(2) 研究分担者

里見 知昭 (SATOMI, Tomoaki)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号: 80588020