

不飽和砂地盤中の塩と水の同時移動に関する実験的研究

飛島建設 技術研究所 正会員 ○小林 薫
 飛島建設 技術研究所 正会員 松元和伸
 新潟大学 農学部 正会員 森井俊広
 鳥取大学 乾燥地研究センター 井上光弘

1. はじめに

沿岸域の不飽和地盤中に保水された水分は、植生を定着させ生態系の形成に貢献している。不圧地下水の動態と共に、不飽和地盤中の塩ならびに水の動態に関して理解を深めることは、沿岸砂浜域の植生を定着させ多様な生態系の形成・再生に資するものと考えられる。しかし、沿岸域での塩と水の同時移動については、まだ解明されていない現象が残されている。特に、不飽和領域における毛管力に伴う塩と水の同時移動に関する現象については、調査研究事例は比較的少ない¹⁾。このことから、不飽和砂地盤中の塩と水の同時移動の挙動を明らかにすることを目的に、内径 20 cm の鉛直一次元円筒装置（塩ビ製）を用いて、潮位変動を模擬した塩水位変動を供試体に与え、供試体中の体積含水率（ θ ）と電気伝導度（EC：ここでは、見かけの塩分濃度）の経時変化を測定した。本稿は、 θ と EC の測定結果を基に、不飽和砂地盤中の塩と水の同時移動について実験的に明らかにした。

2. 鉛直一次元円筒装置を用いた室内実験

(1) 試料と供試体の作製方法²⁾

試料は、珪砂 6 号を用いた。珪砂 6 号の飽和透水係数 K_s を含めた物理的性質を表-1 に示す。

供試体は、図-1 に示す内径 20 cm、高さ 73 cm（最下段のリング容器高さは 13 cm で、その上部 3 段は各 20 cm）の塩ビ製の一次元円筒装置に、最適含水比（ $w_{opt}=11.9\%$ ）に調整した試料を、所定の乾燥密度（締固め度 $D_c=90\%$ ）になるように、手製の突固め板で締固めて作製した。供試体作製時には、各砂層間の密着性向上と水みちの発生を抑えるために、各砂層上面をヘラで粗し、その上に試料を入れて順次締固めて上層を作製した。最下層は厚さ 3 cm で締固め、その上部から厚さ 5 cm ごとに最上層まで順次作業を繰り返し、高さ 73 cm の供試体を完成させた。供試体完成後、供試体内の水分の蒸発を防ぐために、一次元円筒装置上面にビニールシートを被せて 3 時間静置した。その際には、埋設センサーの値に変動がないことを確認し実験を開始した。塩水位面の変動などに伴う供試体内の θ および EC を測定するための、土壤水分センサーと土壤水分・EC センサーは、供試体作製時に所定の高さに溝堀りを行い設置した（図-1 左）。センサー設置時には、センサー周りに空隙を残さないように慎重に突き棒で周辺を締固めた。土壤水分センサー（EC5）を 4 台と土壤水分・EC センサー（5TE）を 5 台設置した。各センサーの設置高さとセンサー番号は図-2 に示すとおりである。

(2) 実験概要

図-2 に示すように鉛直一次元円筒装置の下端部でビニールホースにより定水位塩水供給タンクとまず連結した。次に、

表-1 試料の物理的性質

	単位	珪砂 6 号
土粒子の密度	ρ_s g/cm ³	2.701
最大粒径	D_{max} mm	0.85
10%粒径	D_{10} mm	0.123
30%粒径	D_{30} mm	0.157
50%粒径	D_{50} mm	0.194
60%粒径	D_{60} mm	0.214
均等係数	U_c	1.74
曲率係数	$U_{c'}$	0.938
工学的分類		SP
最大乾燥密度	ρ_{dmax} g/cm ³	1.482
最適含水比	w_{opt} %	11.9
飽和透水係数	K_s m/s	1.31×10^{-4}

* K_s は実験にあわせて締固め度 $D_c=90\%$ の供試体である。

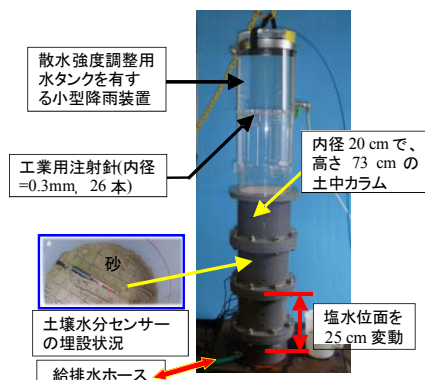


図-1 塩と水の同時移動測定用の一次元円筒装置概要

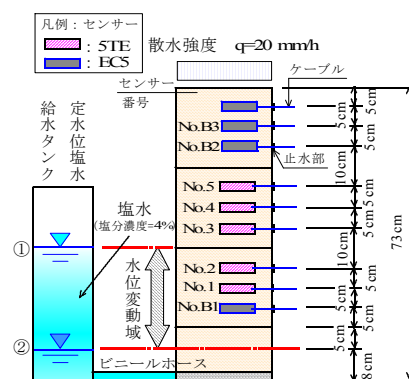


図-2 実験概要図とセンサーの設置高さおよび番号図

キーワード；塩と水の同時移動，土壤水分量，体積含水率，電気伝導度，不飽和砂

連絡先；〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 飛島建設株式会社 技術研究所 TEL 04-7198-7559

供試体の K_s を考慮し、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ の上昇（降下）速度で図-2に示す塩水水位面を②→①まで約40分掛けてゆっくり25 cm 上昇させた。その状態で11時間以上静置し（水位上昇開始から静置終了時間までで12時間）、その間の不飽和領域（センサー番号；No.3～No.B4間）の θ と EC の経時変化を測定した。その後、塩水水位面を①→②まで上昇時と同様に約40分掛けて25 cm 下げた後、初期水位の状態（水位上昇開始から静置終了時間までで12時間）で11時間以上静置し、No.3～No.B4間の不飽和領域の θ と EC の経時変化を連続測定した。実験では、前記作業を3回繰り返した。さらに、供試体下端部より定水位塩水供給タンクとの連結を外し、ビニールホースから塩水を排水させた後48時間静置した。その後、鉛直一次元円筒装置の上部に小型降雨装置を設置し、供試体の最上端から散水強度 $q=20 \text{ mm/h}$ で淡水を供試体上部より浸透させ、下端部より排出させた。

3. 実験結果と考察

塩水水位面（図-2の①水位）以上に設置している不飽和領域内のセンサーによる、塩水水位面の変動に伴う θ と EC の経時変化を図-3と図-4に示す。塩水水位面の上昇・降下に伴い、 θ および EC とともに増加・減小を繰り返している。また、図-4の散水開始直後の EC は、塩分を含んだ降下浸透水により瞬間的に上昇した。その上昇量は、下部に位置するセンサーほど大きくなっていった（センサー番号；No.3→No.4→No.5の順）。その後は、上部からの浸透水（淡水）により塩分が除去されるほど EC はゼロに近づき、散水開始から210分程度でNo.3センサーもほぼゼロの値になり、図-2のNo.3センサーより上部の供試体中に含有していた塩分はほとんど除去されたものと考えられる。さらに、図-3、図-4の中に矢印（点線）で示したように塩水水位面の変動が繰り返すごとに、不飽和砂地盤中の θ と EC（No.4センサーを除く）は徐々に上昇している傾向が見える。これは、繰り返しの供試体中の飽和度上昇と塩分の蓄積が生じたものと考えられる。図-5は、供試体中の塩と水の移動に伴う、各センサーの反応時間差を基に算出した不飽和砂地盤中の塩と水の移動距離と時間の関係（以下、移動速度と記す）を示す。まず、不飽和砂地盤中の塩と水の降下時移動速度は、平均 $8.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ でほぼ一定で、飽和透水係数 ($K_s=1.31 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) の約6割である。一方、毛管力による不飽和砂地盤中の塩と水の上昇時移動速度は、1回目とそれ以降では異なり、2回目以降の方が速いことが分かった。これは、不飽和砂地盤の θ が1回目とそれ以降では異なるためと推察される。また、1回目の上昇時移動速度は、塩水水位面の近傍では $2.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ で、土柱の高さ35 cm 程度になると $4.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ で約1/7に低下した。2, 3回目は、塩水水位面近傍では $1.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 程度で、土柱の高さ35 cm 程度になると $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ で1/6程度まで低下した。さらに、毛管力による上昇時移動速度は、毛管上昇高 h （本実験の $h \approx 40 \text{ cm}$ ）に漸近する程、移動速度が低下することを実験的に確認した。

4. まとめ

本研究では、一次元円筒装置を用いて塩と水の同時移動に関する実験を行った。主な結果は以下の通りである。塩水水位面の変動が繰り返すごとに、不飽和砂地盤中の θ と EC は徐々に上昇する。また、上部からの散水に伴う不飽和砂地盤中の塩と水の降下時移動速度はほぼ一定値を示す。一方、上昇時移動速度は、砂地盤の土壌水分量の保水・含水状態により異なり、土壌水分量が少ない初回（1回目）とそれ以降（2回目以降）では異なる挙動を示した。加えて、上昇時移動速度は、毛管上昇高 h （本実験の $h \approx 40 \text{ cm}$ ）に漸近するほど低下することが確認できた。

謝辞：本研究は、科研費 基盤研究 C（課題番号；22560507）の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献 1) 井上光弘：塩水を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価，水文・水資源学会誌，Vol. 11, No.6, pp.555-564, 1998. 2) 小林 薫，松元和伸，森井俊広，中房 悟：潮位変動に伴う不飽和砂地盤内の塩と水の同時移動に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No.2, pp.I_1141-I_1145, 2012.

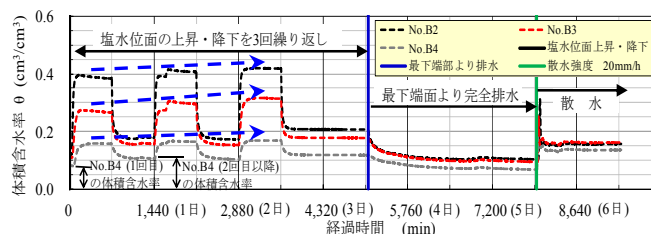


図-3 不飽和砂地盤領域の体積含水率 (θ) の経時変化

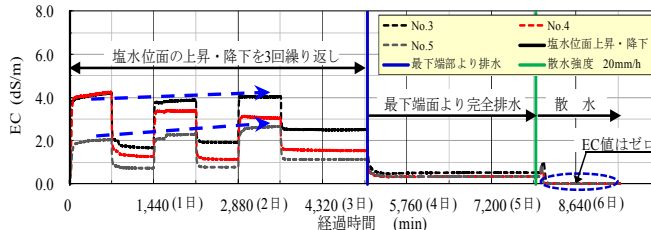


図-4 不飽和砂地盤領域の電気伝導度 (EC) の経時変化

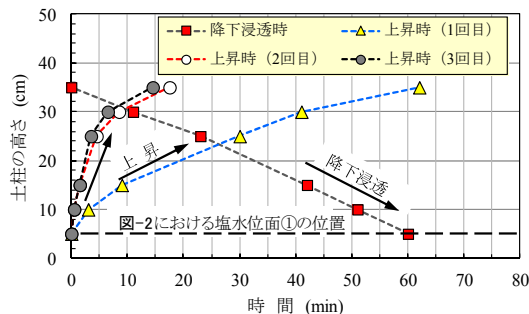


図-5 不飽和砂地盤中の塩と水の上昇・降下時の移動速度