

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 26 日現在

機関番号：92503

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560507

研究課題名（和文）：沿岸域地下水流向流速の直接観測による海底地下水湧出現象の解明と海面上昇の影響検討

研究課題名（英文）：Study of submarine groundwater discharge phenomenon using method of detection of direction and velocity of groundwater flow

研究代表者

小林 薫 (KOBAYASHI KAORU)

飛鳥建設株式会社・技術研究所・副所長

研究者番号：80443638

研究成果の概要（和文）：

本研究では、塩水を用いて鉛直一次元円筒装置による土柱法により水分特性曲線を求め保水特性を把握した。その上で、小型降雨装置を備えた内径 20 cm の鉛直一次元円筒装置を用いて、潮位変動を考慮した塩水位の変動並びに除塩を想定し、上部から散水・浸透流を供試体と与え、体積含水率と電気伝導度の経時変化を測定すると共に、鉛直一次元円筒装置の下端部から排出される全流出水を連続採水した上で、塩分含有量の経時変化について測定し、不飽和地盤内の塩と水の同時移動の挙動について実験的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this paper, we focus on the impact on sandy beaches due to tidal cycle variation, especially on the salt concentration of unsaturated ground. We demonstrate experimentally the simultaneous movement of water and salt concentration of unsaturated ground by water retention test using seawater and freshwater and experimental study of leaching by the surface brine variability and rainfall.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：水資源・地下水流動

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：沿岸砂層・不飽和砂層・塩と水の同時移動・海底地下水湧出・地下水流向流速

1. 研究開始当初の背景

21 世紀は水の世紀と呼ばれる中、地下水は全地球的に地域ごとの水循環において重要な役割を果たすとともに、貴重な水資源として活用されている。しかし、地球温暖化に伴う海面上昇によって沿岸地下水が塩水化すること等、今後全地球的に地域ごとの水資源の量や存在形態が大きく変わることが予想されているものの、その実態の把握は不十分であり今後更なる研究が必要とされている

（文部科学省「気候変動等により深刻化する水問題を緩和し持続可能な水利用を実現する革新的技術の創出」、2009）。特に、地下深部の淡水が塩淡水境界に沿ってせり上がってくる海底地下水湧出（SGD：Submarine Groundwater Discharge）の流動経路と量的把握は、地域ごとの水循環とその変動に大きな影響を及ぼす重要な因子であるにも拘わらず、それを捉える原位置観測が困難であることから、今まで良くわかっていなかった。

海底地下水湧出から見た地下水流動の学術的研究は、主に次の3課題の解決が必要であるとされている(丸井、1998)。

- 1)湧出位置と湧出形態の確認
- 2)水質調査
- 3)量的変動の把握。

この中で、3)海底地盤中の水温、水圧、EC等の長期連続測定や光ファイバケーブルによる面的な海底面温度測定による調査結果等を基に、間接的に海底地下水湧出量の評価を試みている(徳永ら、2005、谷口ら、2006)。しかし、陸域を含めた地下水の流動経路と量的把握に重要な因子である塩淡境界の地下水流動(地下水の流向流速)を原位置で直接観測により実証した調査研究事例はほとんど見当たらない。この大量の海底地下水湧出を実際に有効利用する場合、湧出位置、湧出量や不飽和領域を含めた沿岸域の地下水流動等の変動を十分に解明しておく必要がある。研究代表者は、画像解析手法を用いた地下水流向流速を3次元で評価する高精度な流向流速計や国内外唯一となる長期連続観測ができる独創的な連続式流向流速計(基盤研究(C)(一般)H19~21)を開発・実用化した実績を有する。これらの観測技術を実装すれば、困難であった塩淡境界に沿ってせり上がる地下水流向と流速を原位置で長期かつ連続的に直接観測することが可能となる。

一方、従来水温、水圧、ECの観測に加えて、今まで調査研究される事が少ない不圧地下水、特に不飽和領域の塩と水の同時移動について把握することで、沿岸域を含めた海底地下水湧出現象をより詳細に解明できると考えられる。

2. 研究の目的

沿岸域の淡水が、塩淡境界に沿ってせり上がってくる海底地下水湧出の流動経路と量的把握については、不飽和領域を含めた不圧地下水の挙動が十分解明されていないことから、今まで良くわかっていなかった。

本研究では、塩淡境界を含む沿岸域の地下水流動において、これまでの電気伝導度EC、水温、水圧の観測に加えて、過去には得られていなかった地下水流向流速を同時に長期連続データとして連続式流向流速計(基盤研究(C)(一般)H19~21)を実装し、原位置観測により取得する。室内実験を含め、これらと比較・検証データに用いて、沿岸域の塩淡境界付近の地下水流動及び海底地下水湧出現象を解明する。また、海面上昇等が地表部の不飽和砂層を含めて、海底地下水湧出の流動経路と湧出量等の変動とどのように関係しているのかを明らかにする。

3. 研究の方法

- (1)沿岸域の砂、破碎貝殻の水分特性曲線

沿岸域の砂、破碎貝殻の水分特性曲線を塩水を用いて測定し、塩水が水分特性曲線に及ぼす影響を把握し、シミュレーションを実施する際の不飽和領域の解析精度向上を図る。

(2)室内実験による各種条件下での塩水浸入域、地下水湧出域および海底地下水湧出量変動の解明

沿岸域の降雨、潮汐の影響を受ける不飽和砂層の浸透・流出特性と塩分濃度変動特性の検討を行う。その際の、不飽和砂層に関する浸透・流出特性と塩分濃度変動特性の把握は、一次元円筒型装置を用いて行う。

4. 研究成果

- (1)沿岸域の降雨、潮汐の影響を受ける砂と破碎貝殻の水分特性曲線の検討

1)砂材の水分特性曲線

SWCCに及ぼす塩水の影響は、淡水を用いたSWCCの試験結果と比較し確認した。

保水性試験に用いた試料は、豊浦砂の粒度分布に類似した硅砂6号を選択した。硅砂6号の粒径加積曲線を豊浦砂(参考)のそれと比較して図1に示す。また、物理的性質などについては表1にとりまとめた。なお、飽和透水係数 K_s は、乾燥密度を最大乾燥密度の90%(締固め度 $D_c=90\%$)になるように供試体を作製した上で、定水位透水試験を行い求めた。

供試体の作製については、図2に示すように内径10cm、高さ2.5、5.0および10.0cmの塩ビ製のリングを組み合わせた、全高80cmの一次元円筒装置の中に所定の乾燥密度(締固め度 $D_c=90\%$)になるように、試料を密度調整しながら突き棒を用いて締固めた。供試体の乾燥密度は、 1.334 g/cm^3 である。

試験方法は、潮汐等による海水面が繰り返す変動(干潮と満潮)していることなどを考慮して、排水過程(D)と吸水過程(W)について実施した。排水過程(D)は、供試体の下端より塩水(塩水濃度=4%)を供給し、試料の透水性を考慮して塩水位を非常にゆっくりとした速度($1\times 10^{-2}\text{ cm/s} < K_s = 1.31\times 10^{-2}\text{ cm/s}$)で上昇させ、上端まで塩水位が達した状態で3時間静置した。その後、上部を大気開放状態で下端部より排水を行いそのまま2週間静置した上で、リングの厚さごとに試料の含水比を測定しSWCCの排水曲線を求めた。

また、吸水過程(W)においては、供試体の下端部に塩水位面を設定し、蒸発・吸水等により塩水面の位置が低下しないように塩水を常時供給しながら、毛管力による吸水を2週間継続して、排水過程と同様にリングの厚さごとに試料の含水比を測定しSWCCの吸水曲線を求めた。

さらに、試料の含水比を測定後、十分水洗いを行い、完全に塩分を除去した後に再度乾

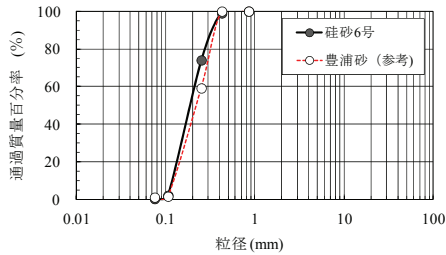


図1 試料の粒径加積曲線

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	$\rho_{d\text{max}}$	g/cm^3 1.482
最適含水比	W_{opt}	% 11.9
飽和透水係数	K_s	cm/s 1.31×10^{-2}

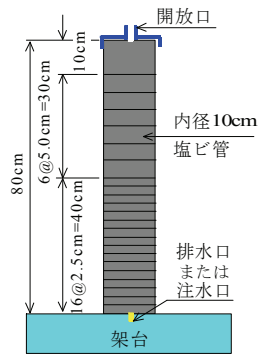


図2 土柱法に用いた鉛直一次元円筒装置の概要

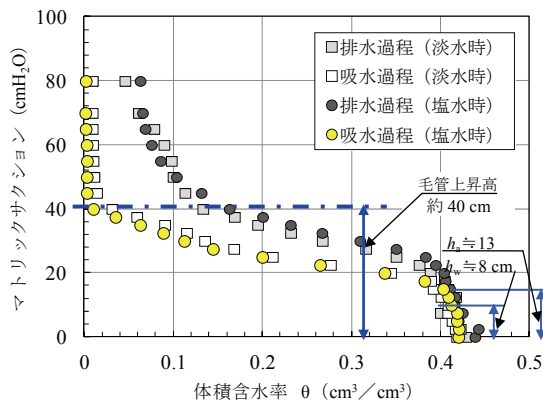


図3 塩水と淡水を用いた場合のSWCCの比較

燥炉で乾燥させ、重量を測定し、水洗い前後の試料の重量を測定した結果を基に、その重量差から含有していた塩分量を把握した。

図3に塩水と淡水を用いたSWCCを示す。両SWCCは、排水過程(D)および吸水過程(W)ともに良く一致している。空気侵入値 $h_a \approx 13$ cm、水分侵入値 $h_w \approx 8$ cm、飽和体積含水率

表2 破碎貝殻の物理的性質

項目	単位	試料名	
		破碎貝殻	
試料の種類	—	ホタテ貝	
粒子密度 ρ_s	g/cm^3	2.671	
自然含水比 W_n	%	0.3	
粒度	最大粒径	mm	19.00
	均等係数 U_c	—	14.00
	曲率係数 U_c'	—	1.480
	50%粒径 D_{50}	mm	2.340
最小間隙比 e_{min}	—	0.763	
最大間隙比 e_{max}	—	1.463	
供試体の乾燥密度 ρ_d	g/cm^3	1.321	
供試体の透水係数 K_s	cm/s	1.82×10^{-1}	

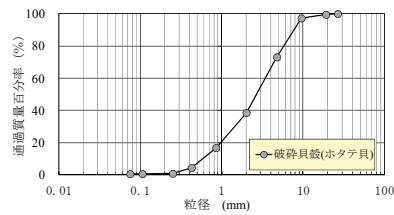


図4 破碎貝殻の粒径加積曲線

$\theta_s = 0.42 \sim 0.43$ および吸水過程(W)の体積含水率がゼロ近傍時のマトリックサクション $\approx 40 \text{ cmH}_2\text{O}$ などである。加えて、両者ともに吸水過程(W)のSWCCは、排水過程(D)のSWCCの下側にあり、明瞭なヒステリシスを示した。以上より、塩水が試料のSWCCに及ぼす影響はほとんど無いことを実験的に確認した。

以上から、定常状態における不飽和砂地盤中の単位塩分量は、土のSWCC(マトリックサクション-体積含水率の関係)と密接に関係することを実験的に確認した。

2) 破碎貝殻の水分特性曲線

貝殻については、十分水洗いをし、 80°C の乾燥炉で24時間乾燥させた後、常温になった貝殻を地盤上にまきだし4ton振動ローラにより転圧破碎した。破碎貝殻の土質試験結果を表2に、粒径加積曲線を図4に示す。飽和透水係数 K_s は、最小・最大乾燥密度試験の結果を基に相対密度 $D_r = 60\%$ を目安に締固めた供試体を用いて変水位透水試験を行い求めた。

礫代替材としての破碎貝殻と一般的な礫材(参考:珪砂6-8mm、 $D_{50} = 6.6 \text{ mm}$)のSWCC(吸水過程)から求まる水分侵入値(hw)などを比較するため、礫材のSWCC(吸水過程)について比較した。

試料の排水過程および吸水過程のSWCCは、両試料とも明瞭な空気侵入値(h_a)および水分侵入値(hw)は得られなかった。これは、一般的な礫材のSWCC(吸水過程)に認められる $h_w \approx 0 \text{ cm}$ と類似している。礫材の代替材として破碎貝殻を用いた場合でも、礫材と同様に $h_w \approx 0 \text{ cm}$ であり、キャピラリーバリ

ア (CB) の性能 (限界長) には影響を及ぼすことはない。このことから、破碎貝殻は、CB の礫代替材として十分適用できることを保水特性から明らかにした。

(2) 不飽和砂地盤中での塩と水の同時移動の挙動

実験は、塩水位面の変動に伴う塩分浸入・残留挙動と上部からの散水に伴う塩分流出挙動について検討する。

1) 試料と供試体の作製方法

試料は、保水性試験と同じ硅砂 6 号を用いた。硅砂 6 号の粒径加積曲線および飽和透水係数 K_s は、前述の通りである。

供試体は、**図 5** 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、各砂層上面をへらで粗し、その上に試料を入れて締固め順次上層を構築した。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締固め作業を繰り返し、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体積含水率および EC を測定するための、土壌水分センサーと土壌水分・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 5** 左)。センサー設置時には、センサー回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。土壌水分センサー 4 台 (デカゴン社製; EC5) および土壌水分・EC センサー 5 台 (デカゴン社製; 5TE) の設置高ささと各センサー番号を **図 6** に示す。

2) 実験概要

図 6 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ぎ連結した。次に、供試体の透水係数を考慮し、 $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度の速度で **図 6** に示す塩水位面を ②→①までゆっくり 25 cm 上昇させた。水位一定の基で 12 時間以上静置し、その間の不飽和領域 (センサー番号; No.3~No.B4 間) の体積含水率と EC の経時変化を測定した。その後、塩水位面を ①→②まで 25 cm 下げて初期水位に戻して 12 時間以上静置し、不飽和領域 (センサー番号; No.3~No.B4 間) の体積含水率と EC の経時変化を連続的に測定した。実験は、前記の作業を 1 回繰り返したケース 1 と 3 回繰り返した

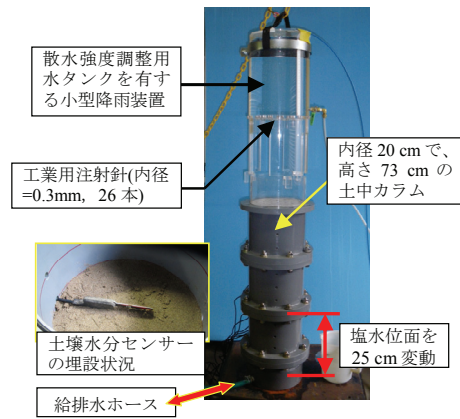


図 5 一次元円筒装置の概要

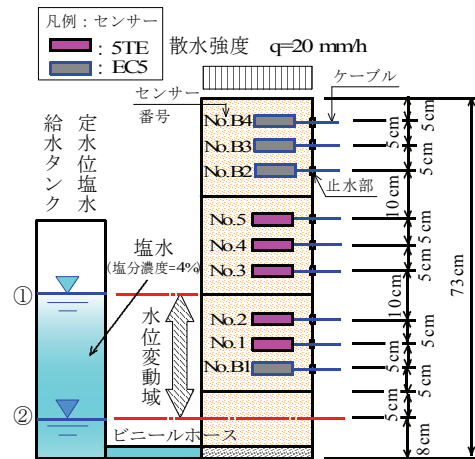


図 6 実験概要図とセンサーの設置高さ及び番号図

返したケース 2 の 2 ケースについて実施した。さらに、両ケースとも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て、そのまま 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 $q=20 \text{ mm/h}$ 相当 (散水量 $Q = 628 \text{ cm}^3/\text{h}$) 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。その際に、不飽和砂地盤中の体積含水率と EC の経時変化を測定すると共に、下端部からの全流出水を 1 リットルビーカーで連続採水し、ビーカーのまま乾燥炉で乾燥させて、塩水の塩分含有量の経時変化についても測定した。

3) 実験結果とその考察

① 塩水位面の変動に伴う塩と水の同時移動

塩水位面 (**図 6** の ①水位) 以上に設置している不飽和領域にあるセンサーの、塩水位面の変動に伴う体積含水率と EC の経時変化を **図 7** と **図 8** に示す。塩水位面上昇・低下に伴い体積含水率、EC の値ともに増加・減小を繰り返している。また、**図 8** の散水開始以降の EC の値は、塩分を含んだ降下浸透水により EC 値は上昇した。その上昇量は、下部に位置するセンサーほどが大きくなっている (センサー番号; No.3→No.4→No.5 の順)。その後は、浸透流が塩分を除去する程 EC 値

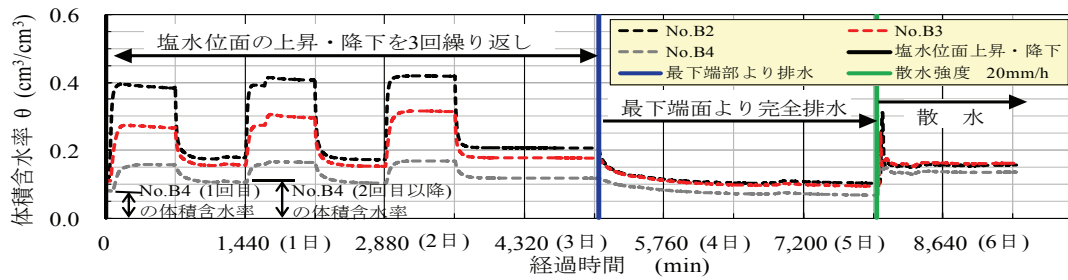


図7 不飽和領域の体積含水率の経時変化(ケース2)

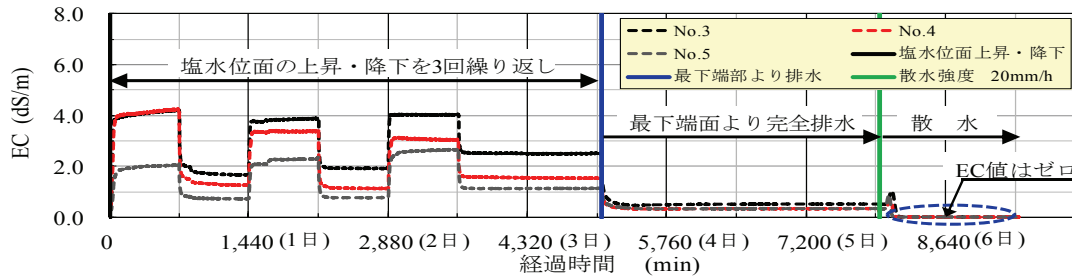


図8 飽和領域のECの経時変化(ケース2)

はゼロに近づき、散水開始から210分程度でNo.3センサーはほぼゼロの値になり、No.3センサーより上部の試料内に含有していた塩分は除去されたものと考えられる。

図9には、各センサー間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、不飽和砂地盤内の塩と水の降下移動速度は、平均 $8.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ でほぼ一定であると共に、飽和透水係数($K_s = 1.31 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$)の約6割程度の値である。一方、毛管力による不飽和砂地盤内の塩と水の上昇時の移動速度は、1回目とそれ以降では大きく異なり、2回目以降の方が上昇時の移動速度は速いことが分かった。これは、不飽和砂地盤の体積含水率が1回目とそれ以降では異なるためと推察される。また、1回目の上昇時の移動速度は、塩水位面の近傍では $2.8 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ で、土柱の高さ35 cm程度になると $4.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ で約1/7まで低下した。2、3回目は、塩水位面の近傍では $1.7 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 程度で、土柱の高さ35 cm程度になると約 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ で1/6程度まで低下した。

② 上部からの散水・浸透流に伴う塩と水の同時移動

図10には散水開始から流出水の塩分がなくなるまでの流出水1リットルに含まれる塩分含有量の変化を示す。

同図には、散水開始から流出水が下端より出始める時間も示している。ケース1の場合は3時間34分、ケース2の場合は3時間57分であった。ケース2の方が時間を要したのは、図10に示すように塩分含有量が多く、供試体内の間隙水の塩分濃度が高いため、流入水の塩分濃度が低く(淡水=ゼロ)、密度勾配により鉛直下向きの流れが少し制限された可能性が考えられる。また、流出水の塩

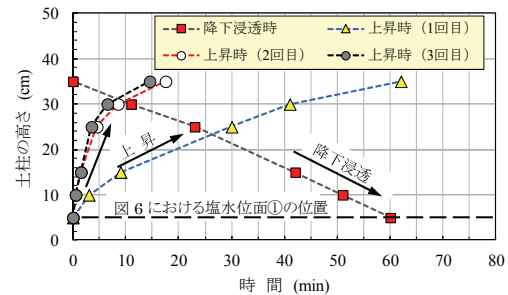


図9 塩と水の上昇・降下時の移動速度

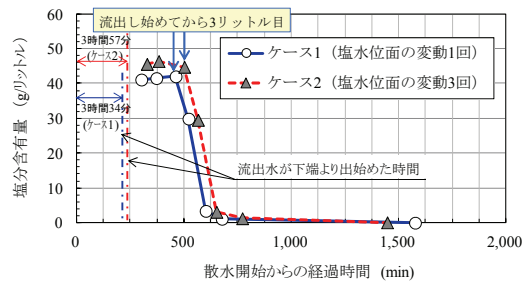


図10 流出水に含まれる塩分含有量

分含有量は、下端部より流出し始めてから3リットルまでは平均41.6 g/リットルと45.6 g/リットル程度である。塩分濃度が4%の場合、塩分含有量は41.7 g/リットルであり、3リットル程度までは供試体内に毛管力によって保持されていた間隙水(塩水)が排出されていることが分かる。その後、両ケースとも塩分含有量は急激に低下し、600分程度でほぼ無視できる程度まで低下し、1,440分後には流出水に塩分はほぼ含有していない。

前記結果より、各ケースの供試体内に含まれていた総塩分含有量は、ケース1で156.5 g、ケース2で168.1 g程度である。ここで、供試体内の塩分流出に要した散水量を算出すると、各供試体内の塩分が無くなるまでの時間は、約1,440分(約24時間)で、20 mm/h

で連続散水した場合、両ケースともに総散水量は約 481 mm になる。本実験における単位面積あたりの塩分量 (g/cm^2) を算定すると、ケース 1 は $0.509 \text{ g}/\text{cm}^2$ ($156.5 \text{ g}/314 \text{ cm}^2$)、ケース 2 では $0.536 \text{ g}/\text{cm}^2$ ($168.1 \text{ g}/314 \text{ cm}^2$) 程度である。これは、本実験に用いた試料(珪砂 6 号)が、中矢ら(2007)が実験した圃場の地盤材料に比較して保水性が低かったことが推察される。したがって、塩害を受けた地盤の塩分除去に必要な散水・浸透量は、単位面積あたりの塩分量と地盤の保水性によって大きく変わる可能性がある。効果的で効率の良い塩分除去を立案する場合には、地盤材料の保水性も把握しておくことが重要であると考えられる。

4) 結論

本研究では、潮位変動に伴う不飽和砂地盤内の毛管力による塩と水の同時移動の挙動について検討するために 2 種類の室内実験を行った。主な結果は以下の通りである。

(1) 塩水と淡水を用いた SWCC を比較した結果、塩水が砂材の SWCC に及ぼす影響はほとんど無いことを実験的に確認した。また、本実験の中で検討した結果、塩水を用いた砂材の排水過程(D)および吸水過程(W)における SWCC は、土の SWCC を記述するために広く用いられている van Genuchten 式で概ね良好にモデル化できる。

(2) 破碎貝殻の排水過程および吸水過程の SWCC は、明瞭な空気侵入値(h_a) および水分侵入値(h_w)は得られなかった。これは、一般的な礫材の SWCC に認められる $h_a \approx 0 \text{ cm}$ 、 $h_w \approx 0 \text{ cm}$ と類似しており、保水特性から破碎貝殻は礫材の材料特性と類似している。

(3) 散水・浸透流による不飽和砂地盤内の塩と水の降下速度はほぼ一定値を示した。一方、上昇時の移動速度は、初回とそれ以降では大きく異なる挙動を示した。また、上昇時の移動速度は、毛管上昇高(本実験 $\approx 40 \text{ cm}$)に漸近する程、塩と水の同時移動速度は低下した。

4) 塩害を受けた地盤を除塩するのに必要な散水・浸透量は、単位面積あたりの塩分量と地盤の保水性によって大きく異なる可能性がある。効果的で効率の良い除塩計画を立案するためには、地盤材料の保水性についても十分把握することが重要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

①中房 悟、小林 薫、松元和伸、森井俊広、キャピラリーバリアを利用した盛土式廃棄物処分施設における底部集排水砂層の垂直

応力下での排水に関する性能評価、地盤工学ジャーナル、査読有、Vol.8、No.2、2013、pp.197-207

②中房 悟、小林 薫、松元和伸、森井俊広、貝殻を再利用したキャピラリーバリア地盤の大型土槽実験による限界長の評価、土木学会論文集 C (地圏工学)、査読有、Vol.69、No.1、2013、pp.126-139

③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)、査読有、Vol.68、No.2、2012、pp. I_1141- I_1145

④Nakafusa S., Kobayashi K., Morii T. and Nishimura T., Alternative Employment of Crushed Shell Particles in Capillary Barrier of Soil, Int. J. of GEOMATE, 査読有、Vol.1、No.1、2011、pp.50-55

〔学会発表〕(計 13 件)

①小林 薫、松元和伸、森井俊広、井上光弘、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、土木学会、2013 年 9 月 5 日、日本大学 生産工学部津田沼キャンパス

②森井俊広、井上光弘、竹下祐二、小林 薫、キャピラリーバリア機能を利用した地盤中の塩分移動制御、地盤工学会、2012 年 9 月 5 日、八戸工業大学

③Nakafusa S., Kobayashi K., Morii T. and Nishimura T., Alternative Employment of Crushed Shell Particles in Capillary Barrier of Soil, GEOMAT2011、2011 年 11 月 22 日、津都ホテル (三重県津市)

〔図書〕(計 2 件)

①小林 薫、(財)全国建設研修センター、掘削と地下水掘削における地下水問題一、2012、113

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 薫 (KOBAYASHI KAORU)
飛鳥建設株式会社・技術研究所・副所長
研究者番号：80443638

(2) 連携研究者

西村友良 (NISHIMURA TOMOYOSHI)
足利工業大学・工学部・教授
研究者番号：00237736

(3) 研究協力者

金内昌直 (KANAUCHI MASANAO)
株式会社レアックス・技術研究室・部長
研究者番号：-