

干潟と砂浜の保水動態機構と許容地下水位の解明

Mechanisms of Water Retention Dynamics in Intertidal Sandy Flats and Beaches

佐々真志¹・渡部要一²・石井嘉一³

Shinji SASSA, Yoichi WATABE and Hirokazu ISHII

In this paper we describe and clarify the mechanisms of water retention dynamics in intertidal sandy flats and beaches. This was done by performing field observations, laboratory experiments and theoretical analyses, which developed in an interactive manner. The combined results demonstrate that the difference in the water retention dynamics for sandy flats and beaches arises from the difference in pore water migrations that take place around air entry suctions for both types of the soils. Furthermore, it is found that for a given sandy soil, there exists a critical ground water level above which the degree of saturation does not decline. Two quantitative index are proposed for assessing and creating such water retention fields. The results obtained can directly apply to the design and management of artificial sandy flats.

1. はじめに

砂浜に比した干潟土砂の保水性は, 生物生息からの要請条件として重要である(竹内, 2003; 風呂田, 2003). しかし, 保水性を満足するために地盤内の地下水位の低下をどの程度まで許容すればよいのかについては, 未だ明らかにされていない(国土交通省港湾局, 2003). これに関連して, 砂質干潟と砂浜の違いも明確には定義されていないのが現状である(国土交通省港湾局, 2003).

生態系再生に向けた造成干潟の設計においては, 一般に波や流れに対する土砂の安定性の観点から土砂の粒度を選定するが, 土砂の保水性能を規定するための具体的な指針が無く大きな課題であった.

本研究では, 上述を背景として, 砂質干潟と砂浜土砂の保水動態に関する現地観測, 室内実験ならびに理論解析を統合的に実施することによって, 粒度の異なる土砂の保水動態機構を定量的指標により明らかにし, 地盤内部の土砂環境場に基づいて, 干潟と砂浜の違いを明確化できることを示すとともに, 活力ある干潟土砂環境を実現するための保水場の性能評価・設計指針を開発・提示することを目的としている.

2. 地下水位制御による保水性試験

(1) 試験方法と内容

自然砂質干潟(盤洲干潟)の保水動態に関する現地観測結果(佐々・渡部, 2005)を踏まえて, 当該干潟土砂を用いた一連の保水性試験を行った. 具体的には, 地下

水位が干潟の規模や地盤高によって大きく変わることを考慮して, 様々な地下水位低下にともなう干潟土砂の水分保持形態について詳しく調べた. 当該土砂の中央粒径は $D_{50}=0.18 \sim 0.24$ mm であり, 細粒分 ($D<75 \mu\text{m}$) を数%含有する. 土粒子比重は $G_s=2.715$, 土砂の最大間隙比 $e_{\max}=1.17$, 最小間隙比 $e_{\min}=0.73$ である. 地盤の相対密度 D_r は, $(e_{\max}-e)/(e_{\max}-e_{\min})$ によって定義される.

本試験では, 水槽中に設置した多孔質底板付きの円筒アクリル容器に所定の相対密度 $D_r=43.4\%$, 66.4% , 81.8% の地盤を作成して, 地下水位 $G.W.L$ を $0 \sim -450$ mm の範囲に 10 段階に設定した上で, 表層土砂 ($-30 \text{ mm} \leq z \leq 0$) の含水比 w と地表位置 ($z=0$) に対応するサクション s (大気圧を基準とした負の間隙水圧) を合せて計測した. サクション計測には, 携帯型テンシオメータ (Sassa・Watabe, 2007) を用いた. 各地盤は現地での干出時間を考慮して, 計 4.5 時間かけてその地下水位を -450 mm まで低下させた. そして, 土粒子の比重 G_s と相対密度 D_r に対応する間隙比 e および計測した含水比 w を用いて, 飽和度 $S_r=w \cdot G_s/e$ を算出した. この際, 地下水位を低下させる前の地盤作成時の初期飽和度 S_{r0} は $92\% \sim 100\%$ であった. 本試験結果の提示においては, 地下水位低下にともなう水分保持特性を議論するために, 上述の初期飽和度 S_{r0} により正規化した飽和度 S_r/S_{r0} を用いる.

(2) 試験結果

保水性試験結果を図-1 に示す. まず, 任意の相対密度地盤において, 地下水位の低下とともにサクションが発達し, かつ地下水位低下によるサクションの増加割合が水の単位体積重量 γ_w にほぼ一致していることがわかる. そして, このようなサクションと地下水位間の線形関係が忠実に成り立つサクションの変動範囲 ($0 \sim 2$

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部主任研究官

2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室長

3 学生会員 修(工) 中央大学大学院理工学研究科

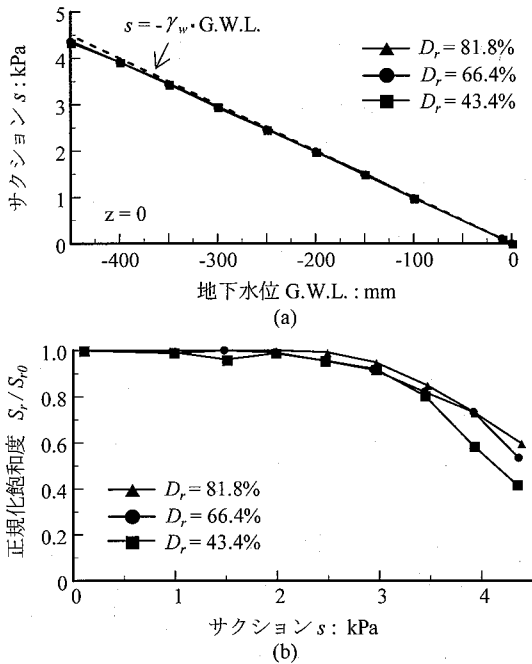


図-1 砂質干潟（盤洲干潟）土砂を用いた地下水位制御による保水性試験結果 (a) 地下水位とサクシヨンの関係, (b) サクシヨンと飽和度の関係

kPa) では, 相対密度 D_r によらず $S_r/S_{r0} \cong 1$ と土中水分は良好に保持されていることがわかる. しかし, 比較的緩詰め状態 ($D_r=43.4\%$, 66.4%) ではサクシヨンが 2 kPa 以上になると, 密詰め状態 ($D_r=81.8\%$) ではサクシヨンが 2.5 kPa 以上になると, S_r/S_{r0} 値が低下し始め, サクシヨンが 4 kPa を超えるといずれの場合の S_r/S_{r0} 値も 0.6 以下と著しく低くなっている.

結局, 以上の結果は, 地下水位低下にともなってサクシヨンがある一定値を超えて発達すると, 干潟土砂は飽和状態を保持することができず飽和度が著しく減少することを明確に示している.

3. 保水動態の理論解析

(1) 解析方法と内容

上述のような保水動態のメカニズムを詳しく検証するために, 一連の理論解析を行った. 基本となる場の方程式は, 土の構造骨格に関する釣合式, 間隙水と間隙空気それぞれの対する貯留方程式である. 方程式系を閉じるために, 土の構造骨格に関する弾塑性構成式, 土中水分特性式および間隙流体 (間隙水および間隙空気) に関する Darcy 則を組み込んでいる (Sassa ら, 2005). 本研究では, サクシヨン s - 飽和度 S_r 関係の具体形として, Van Genuchten (1980) による提案式に残留飽和度の概念を取り入れた次式を用いた.

$$S_r = S_{rd} + \frac{(1 - S_{rd})}{[1 + (a \cdot s)^b]^c} \quad (1)$$

ここに, S_{rd} は残留飽和度, a , b , c は材料パラメタである. 本解析では, 前章で記述した干潟土砂の水分保持特性を参考に次の値を用いた: $S_{rd}=0.25$, $a=0.2 \text{ kPa}^{-1}$, $b=5$, $c=2.5$. 間隙水の透水性に関しては, その飽和度依存性を次式のかたちで考慮した.

$$k_w/k_w^* = \exp[l \cdot (S_r - 1)] \quad (2)$$

ここに, k_w は透水係数, k_w^* は飽和状態の透水係数, l は材料パラメタである. この際, 上述の干潟土砂に対する透水試験結果を踏まえて, $k_w^*=5 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$, $l=8.0$ を用いた. また, 簡明を期すために, 間隙空気圧は常に大気圧と一致すると仮定した. 本解析に用いたサクシヨン s - 飽和度 S_r 関係 (式 (1)) を図-2 に示す. サクシヨンがゼロからある値までは土は飽和状態 ($S_r=1$) を保つ. ある値以上になると土は不飽和状態 ($S_r<1$) に遷移する. このような飽和から不飽和状態に遷移する境界のサクシヨン値を空気侵入サクシヨン値 s_{aev} (air entry value: aev) と呼んでいる. 図-2 において空気侵入サクシヨン値 $s_{aev} \cong 2 \text{ kPa}$ である. s_{aev} 値は, 通常, 土砂の粒径が細かくなると大きくなり, 粗くなると小さくなる (Fredlund and Rahardjo, 1993). サクシヨンが s_{aev} 値以上に上昇すると, 飽和度は次第に低下し, 最終的に気乾状態に相当する残留飽和度 S_{rd} に達する.

本解析のねらいは, 地下水位低下にともなう空気侵入サクシヨン値 s_{aev} 前後の土中水分動態を詳しく調べることである. 具体的には, 水位が地表面に一致し地盤内に静水圧分布が形成されている状態を初期条件として, 地表からの水分蒸発有り無しの双方の条件下において, 地下水位 $G.W.L$ を空気侵入サクシヨン値 s_{aev} の換算水頭値 $-s_{aev}/\gamma_w = -200 \text{ mm}$ の前後, 正確には $G.W.L = -150 \text{ mm}$ (Case 1) と $G.W.L = -450 \text{ mm}$ (Case 2) まで 4.5 時間かけて低下させて, 双方のケースにおけるサクシヨン・飽和度の動態を詳しく解析した. 地表からの水分蒸発速度 EVR は, $EVR=1 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ と $3 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ の 2 種類に設定した. 以下では, 最も乾

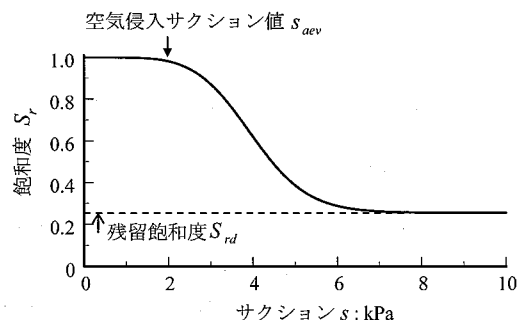


図-2 保水動態の理論解析に用いた水分保持特性

燥リスクの高い地表層 ($z = -5 \text{ mm}$) の水分保持動態に着目する。

(2) 解析結果と考察

地下水位 $G.W.L.$ の低下が空気侵入サクション値 s_{aev} の換算水頭値 $-s_{aev}/\gamma_w$ よりも浅い場合 (Case 1) のサクション深さ分布の解析結果を図-3(a)に示す。同図において地表蒸発が無い場合 ($EVR=0$)、地下水位上のサクションの分布は、全水頭一定線と完全に一致し、土中水分はそのまま保持される。一方、地表蒸発が有る場合 ($EVR>0$) には、地表蒸発速度 EVR に応じたサクション勾配が地中に発達して土中水分の上方移動が生じることによって、表層土砂の飽和状態が保持されることがわかった。このような地表蒸発-水分供給の連動過程の帰結として、現地干潟において夏の干出時に観測したような土中塩分集積 (佐々・渡部, 2005) を定量的に説明することができる。具体的には、干出前の土中塩分濃度を C^* として、間隙率 $n=e/(1+e)$ の地盤深さ $-D \leq z \leq 0$ を対象とすると、干出して一定時間 t 経過後の土中塩分濃度 C は、次式によって予測することができる。

$$\frac{C}{C^*} = 1 + \frac{EVR}{n \cdot D} t \quad (3)$$

地表蒸発フラックス $EVR=1 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ の場合のサクション深さ分布の解析結果が現地観測結果 (佐々・渡部, 2005) と良好に対応することから、観測時の諸条件 $n=0.46$, $D=100 \text{ mm}$, $t=4$ 時間を考慮すると、式 (3) による予測 C/C^* 値は 1.3 となり実測値 1.2 と理

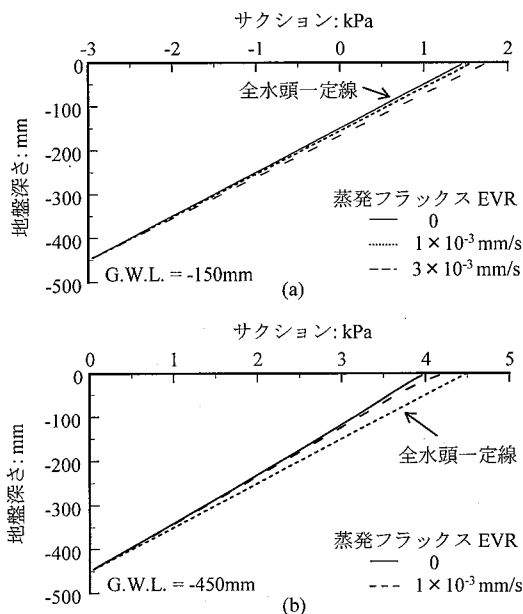


図-3 保水動態の理論解析結果：土中サクションの深さ分布 (a) Case1, (b) Case2

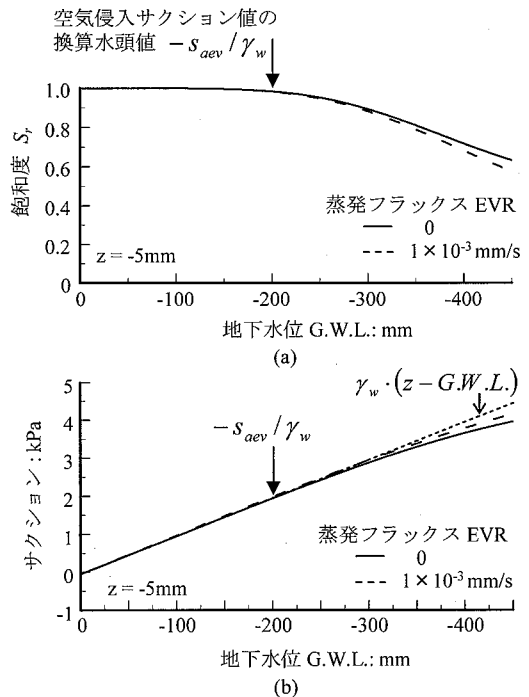


図-4 保水動態の理論解析結果 Case2：(a) 地下水位と飽和度の関係、(b) 地下水位とサクションの関係

論的に整合する。

地下水位 $G.W.L.$ の低下が空気侵入サクション値 s_{aev} の換算水頭値 $-s_{aev}/\gamma_w$ よりも深くなる場合 (Case 2) には、状況は大きく変化する。すなわち、地表蒸発の有無に関わらず、地下水位上のサクションの分布 (図-3 (b)) は、全水頭一定線からサクション過小側にシフトし間隙水の鉛直下方への流下現象が発生する。その帰結として、地盤表層の飽和度が地下水位低下とともに次第に減少していくことがわかった (図-4(a))。又、同一の地下水位低下に対して地表蒸発が有る場合には無い場合に比べて飽和度がさらに低くなる (図-4(a))。このように土中水分が保持されない貧保水場では、サクションと地下水位の間の 1 対 1 の線形関係も成立しなくなることがわかった (図-4(b))。

4. 砂浜の貧保水動態メカニズム

ここでは上述の保水動態の試験・解析結果に照らして、砂浜の貧保水動態メカニズムを検証する。この目的のために、立花釣が浜海岸の潮間帯の引き潮過程において実施した現地観測結果を提示する。砂浜の砂の中央粒径 $D_{50}=1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ である。同等の粗砂の水分保持特性について、図-5 に示す大蔵砂浜の観測結果 (Sassa ら, 2005) を参照する。本結果から同砂浜砂に対する空気侵入値 s_{aev} は、 0.5 kPa 程度であるといえる。このことは、

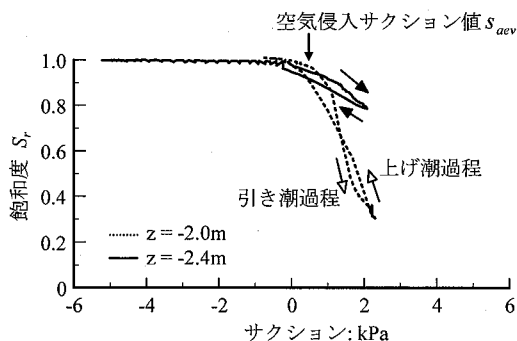


図-5 砂浜の水分保持特性：大蔵海岸における観測結果

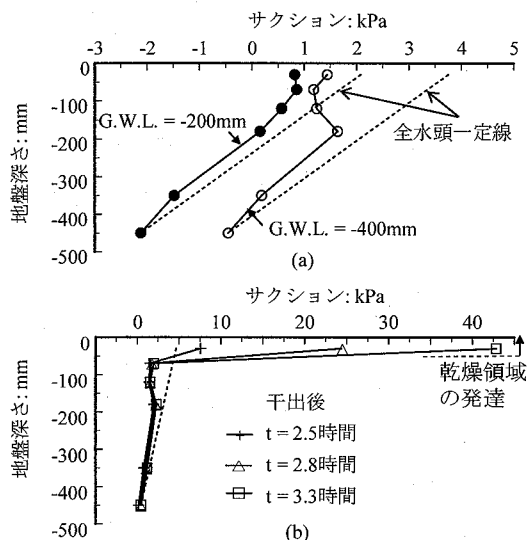


図-6 砂浜のサクシオン深さ分布：釣が浜海岸の潮間帯における引き潮過程の観測結果

上述の結果を踏まえると、当該粗砂では地下水位が $-s_{aev}/\gamma_w = -50$ mm よりも深くなると、間隙水が鉛直下方に流下して土中水分が保持されなくなることを示している。

立花釣が浜の潮間帯において観測したサクシオンの深さ分布を図-6に示す。本結果から地下水位低下にともなう間隙水の下方移動現象を明瞭に確認することができる。図-6(a)から引き潮過程において潮間帯の砂浜内部に発達したサクシオンは0～2 kPaの範囲であり、現地干潟土砂に発達したサクシオンと同等である。このことは、土砂の空気侵入サクシオン s_{aev} 値の重要性を浮き彫りにしている。つまり、砂浜土砂の空気侵入サクシオン s_{aev} 値は0.5 kPaと干潟土砂の2～2.5 kPaよりも顕著に低い。これは、砂浜土砂では干潟土砂に比べて、土中水分を保持する力が弱いことを意味する。それゆえ、干出時に地下水位が当該 s_{aev} 値の換算水頭値 $-s_{aev}/\gamma_w$ よりも

りも深くなると、たちまち土中のサクシオン勾配が全水頭一定分布に追随出来なくなり、下向きの動水勾配が形成されて鉛直下方への間隙水の流下現象が進展した(図-6(a))。その結果、表層土砂の飽和度が著しく低下し、サクシオンが急激に上昇して乾燥領域が発達していくことを明らかにした(図-6(b))。このような貧保水場では地下水位とサクシオンの間に1対1の線形関係が成立しないのは明らかである。

5. 保水場の評価・設計指針

保水動態に関する上述の現地観測・室内試験および理論解析結果に基づいて、地下水位低下に対して土中水分が良好に保持されるような保水場の評価指針を規定することができる。すなわち、良好な保水場においては、地下水位 $G.W.L.$ は任意の地盤深さ z におけるサクシオン s と実質1対1の線形関係を有して、次式が成り立つ。

$$-s/\gamma_w + z \cong G.W.L. \quad (4)$$

干出時地盤内のサクシオンと地下水位の間に上式(4)の関係が成り立たない場合には、既述のメカニズムに基づいて貧保水場すなわち不飽和状態になっていると考えてよい。この点についての詳細は、佐々・渡部(2006)を参照されたい。

本論文では、空気侵入サクシオン値 s_{aev} の換算水頭値 $-s_{aev}/\gamma_w$ が、土中水分が保持されるための限界地下水位深さを表すことを明らかにした。すなわち、土中水分保持を満足するための干出時地盤内の許容地下水位 $G.W.L.$ は次式によって規定することができる。

$$-s_{aev}/\gamma_w \leq G.W.L. \leq 0 \quad (5)$$

上式(5)で定義される地下水位の範囲において、土中水分は精確に保持され良好な保水場が形成される。一方、それよりも深くなると、土中水分が保持されなくなり貧保水場が形成される。空気侵入サクシオン値 s_{aev} は、土砂の粒径や間隙状態によって大きく異なるため、これを具体的に定義することは、上式(5)を実設計に適用する上で重要である。この目的のために、土砂の有効粒径 D_{10} と間隙比 e の違いを考慮した空気侵入サクシオン値 s_{aev} の推定式として次式を提案する。

$$s_{aev} = \frac{\phi}{e \cdot D_{10}} \gamma_w \quad (6)$$

ここに、 $\phi = 20 \text{ mm}^2$ は係数である。上式(6)の妥当性を検証するために、上述の自然砂質干潟(盤洲干潟)、砂浜(大蔵海岸)および人工干潟(尾道造成干潟、国土交通省広島港湾空港技術調査事務所2006)の土砂に対する観測・実験結果を用いる。図-7に各土砂の実測 s_{aev} 値と式(6)により予測した s_{aev} 値をプロットしている。同予測に用いた土砂粒径 D_{10} および間隙比 e は、次の通りである：盤洲干潟 $D_{10} = 0.1 \text{ mm}$ 、緩詰め $e = 0.98$ (D_r

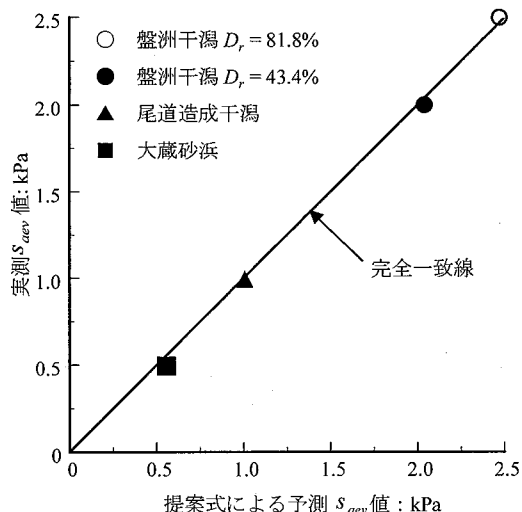


図-7 空気侵入サクシジョンの予想値と実測値の比較

=43.4%), 密詰め $e=0.81$ ($D_r=81.8\%$); 大蔵砂浜 $D_{10}=0.45$ mm, $e=0.8$; 尾道造成干潟 $D_{10}=0.25$ mm, $e=0.8$. 本図より, 実測値と予測値は良好に一致している. したがって, 式(6)を用いて土砂の空気侵入サクシジョン値 S_{aev} を評価して, これを式(5)に代入することによって, 良好な保水場を実現するための干出時地盤内の許容地下水位を設計することができる.

6. ま と め

干潟と砂浜の保水動態機構を解明し保水場の評価・設計指針を開発することを目的として, 砂質干潟と砂浜における現地動態観測, 地下水位制御による保水性試験および保水動態に関する理論解析を一体的に実施した. 得られた主要な知見は以下の通りである.

- (1) 自然砂質干潟におけるサクシジョンを核とした保水動態の現地観測結果 (佐々・渡部, 2005) すなわち干出時の地表からの水分蒸発, サクシジョン深さ勾配に基づく表層への水分供給, 土中塩分集積過程が連動した干潟土砂の保水機構を理論的に実証した.
- (2) 干潟と砂浜の保水動態の違いが, 地下水位低下に伴う空気侵入サクシジョン値 S_{aev} 前後における間隙水移動の差異によって支配されていることを初めて明らかにした. すなわち, 地下水位が空気侵入サクシジョン値 S_{aev} の換算水頭値 $-S_{aev}/\gamma_w$ よりも浅い場合には, 地表蒸発作用下においても土中水分は間隙水の上方移動によって精確に保持される. しかし, 地下水位が空気侵入サクシジョン値 S_{aev} の換算水頭値 $-S_{aev}/\gamma_w$ よりも深くなる場合には, 間隙水の鉛直下方への流下現象が発生し, 結果として土砂の飽和度

が減少することを明らかにした. 砂浜は後者に該当し, 地盤内に誘起されているサクシジョンが S_{aev} 値よりも高いために貧保水場が形成される. 一方, 砂質干潟は前者に該当し, 地盤内に誘起されているサクシジョンが S_{aev} 値よりも低いために, 良好な保水場が形成されることを示した.

- (3) 上述の得られた知見に基づいて, 保水場に関わる定量的な評価および設計指針を開発した. 干出時に土中水分が良好に保持される場においては, 地下水位上の任意の地盤深さのサクシジョンは水の単位体積重量 γ_w を勾配として地下水位と1対1の線形関係を有することを明らかにした. これにより, 干出地盤の保水性能を現地でリアルタイムに評価することができる. さらに, 良好な保水場を実現するための地下水位低下量の許容値が土砂固有の空気侵入サクシジョンの換算水頭値 $-S_{aev}/\gamma_w$ によって規定できることを明らかにし, 造成干潟の設計に直接寄与しうる許容地下水位の設計指針を開発・提示した.

参 考 文 献

- 国土交通省港湾局(2003): 海の自然再生ハンドブック, 第2巻, 干潟編, 138p.
- 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所(2006): 干潟造成技術マニュアル (Ver. 1) ~成功事例に学ぶ干潟造成技術~.
- 佐々真志・渡部要一(2005): 砂質干潟の土砂環境場におけるサクシジョン動態とその果たす役割, 海岸工学論文集, 52巻, 土木学会, pp. 981-985.
- 佐々真志・渡部要一(2006): 砂質干潟の生態土砂環境場に果たすサクシジョンの役割-巣穴住活動/保水場の性能評価・設計指針, 港湾空港技術研究所報告, 45巻, 4号, pp. 61-107.
- 竹内 均(2003): 地球環境調査計測事典 第3巻沿岸域編, フジテクノシステム, pp. 29-37.
- 風呂田利夫(2003): 干潟保全再生の技術と活用, Civil Engineering Consultant Vol. 221, pp. 24-26.
- Fredlund, D.G. and H. Rahardjo (1993): Soil Mechanics for Unsaturated Soils, New York; Wiley, 544p.
- Sassa, S., F. Li and H. Sekiguchi (2005): Response of saturated/unsaturated gravelly sand to tidal fluctuations, Geotechnical Special Publication, 143, Am. Soc. Civ. Eng., pp. 174-186.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2007): Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. Journal of Geophysical Research, 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575.
- Van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil. Sci. Am. J., 44, pp. 892-898.