

気象水文イベントに対する砂浜内のサクシオン応答予測

関口秀雄*・李 風英**・佐々真志***

本研究では、養浜砂浜地盤におけるサクシオンの発達性状の把握を目指して、砂盛土の動態観測を実施し、秋季から7ヶ月間の観測成果に基づいて、降雨時およびその後の晴天期間におけるサクシオンの推移を詳しく検討している。観測結果によると、台風0421号および台風0423号来襲時の特徴的な降雨パターンを反映したサクシオン応答が明瞭にとらえられている。さらに、提案応力浸透連成解析手法に基づいて、イベント時のサクシオン応答の再現を試みるとともに、サクシオンの発達に及ぼす長期晴天期間の影響を検討している。

1. はじめに

砂浜は消波機能、水質浄化機能を有するのみならず、人々に潤いと憩いの場を提供する貴重な親水空間である。そのため、砂浜の安全管理モニタリングは極めて重要となる。しかしながら、2001年12月30日に大蔵海岸で発生した人工砂浜の陥没事故は、水際不飽和砂質地盤内の空洞の形成、保持機構が不明であることを端的に示した(土木学会海岸工学委員会, 2002)。

乾燥した砂は、さらさらと水のように流れる。そのため、極度に乾燥した砂浜の表層には空洞は形成し難い。一方、湿った砂はサクシオンの作用により見かけの粘着力を有するため、その強度・流動特性は乾いた砂のそれとは様相を大きく異にする。定性的にはこのように扱えられるものの、養浜砂造成地盤内のサクシオンの実態を長期間にわたって観測、検討した研究は皆無といってよい。大蔵海岸の陥没事故の発生は12月末であったことから、台風等の気象イベントの発生しやすい秋季から冬季を含む期間のサクシオンの連続観測は特に意義深いものと考えられる。

本研究は、このような認識のもとに、砂盛土を対象として、2004年9月17日から2005年5月2日までの期間のサクシオンおよび水分移動の動態観測を行ったものである。この間、台風0421号、台風0423号等のイベント来襲にともなう砂盛土内のサクシオン応答を観測し得たことをふまえ、提案予測モデル(Sassaら, 2005)に基づく再現解析を試み、水際不飽和地盤におけるサクシオン消長の物理過程の定量的解明に資することを目指す。

2. 不飽和地盤の応力浸透連成解析の要点

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に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)。

土中水分保持に関する特性式としては、簡明を期すために次式の表現を用いた。

$$\dot{S}_w = C_s \dot{s}; C_s = -\frac{1-S_{w0}}{s+p_r} \xi \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\xi = \exp(-a(s-b))$$

ただし、 S_w は飽和度、 S_{w0} は初期の飽和度、 s はサクシオンを表わす。後述の解析ではケイ砂6号試料を念頭において、以下のようなパラメータ値を設定した。

$$p_r = 4.0 \text{ kPa}; a = 3.0 \text{ kPa}^{-1}; b = 3.5 \text{ kPa}.$$

不飽和土においては、透水係数の値が飽和度に応じて著しく変化する。本研究では、その効果を次式によって考慮している。

$$k_w = k_w^* \exp[-l_w(1.0-S_w)] \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k_w^* は飽和状態における透水係数、 l_w は透水係数の飽和度依存性を具体的に規定するためのパラメータである。

後述の解析ではケイ砂6号試料を念頭において、次のようにパラメータ値を選定した(図-1参照)。

$$k_w^* = 0.04 \text{ cm/s}; l_w = 8.0 \sim 9.0.$$

3. 気象水文イベントに対する砂質盛土地盤の応答

(1) 動態観測計画および土性評価

ケイ砂6号(平均粒径0.26 mm)を用いて、底面寸法3.5 m×3.5 m、天端寸法1.5 m×1.5 m、厚さ1 mの台形砂盛土を防災研究所構内に造成し、2004年9月17日から2005年5月2日まで動態観測を行った。砂盛土の造成に先立ち、表土を0.2 m程度切削して礫材で置き換え、その表面に市販の防砂シートを敷設した。砂盛土の法面を自立させ、かつ準一次元的な降雨浸透場を実現するために、砂盛土周囲を土糞で保持した。盛土中に埋設した主

* フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所
** 正会員 工(修) 京都大学防災研究所
*** 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所

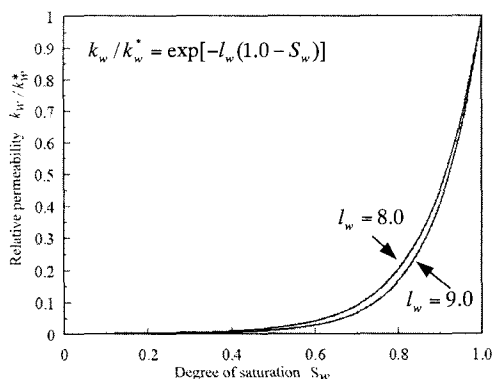


図-1 設定した相対透水係数と飽和度の関係

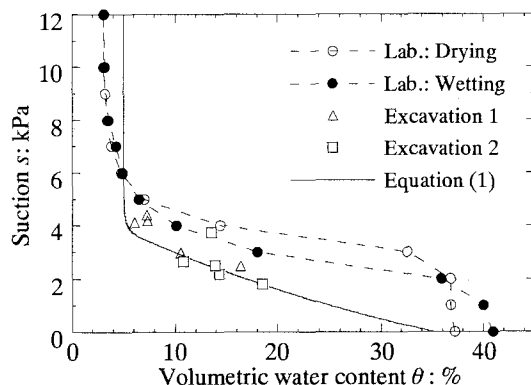


図-2 サクシオンと体積含水率の関係

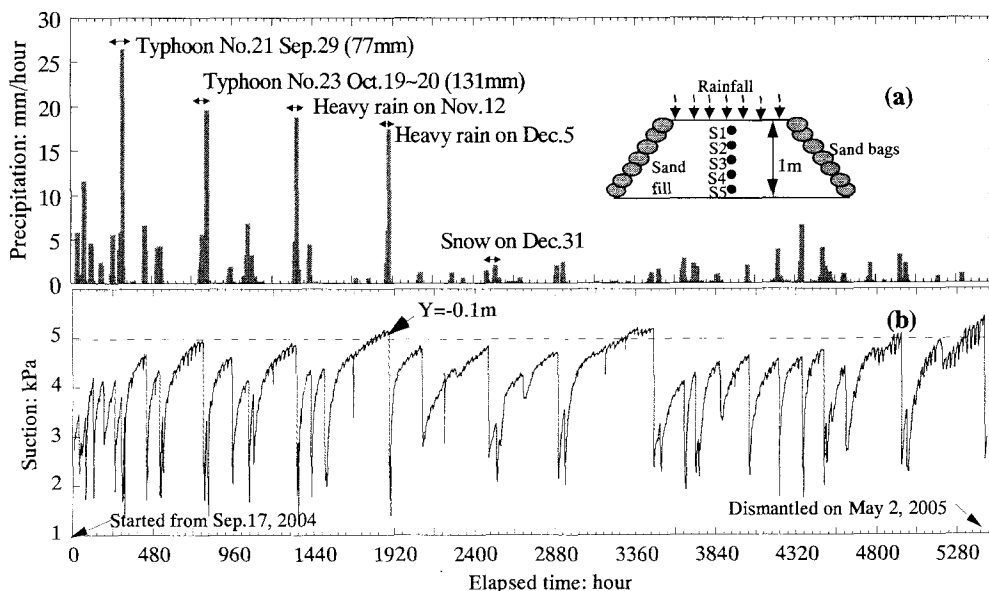


図-3 観測全期間中の降雨と砂盛土浅部のサクシオン時刻歴

要なセンサは次のとおりである：給水可能テンシオメータ（深度0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 m）；土中水分センサ TDR（深度0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 m）；サーミスタ（深度0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 m）。現地の雨量、気温、湿度を計測するために、転倒式雨量計および温湿度計を設置し、盛土中に設置したセンサ群からの出力信号と合わせて、1分間隔でデータロガーに自動記録させた。

砂試料および防砂シート試料に対して室内定水位透水試験を実施した。その結果、砂試料の飽和透水係数は0.04 cm/s、防砂シート試料の飽和透水係数の値は0.3 cm/sであった。砂試料の水分保持特性の計測には、吸引法（中野ら、1995）を用いた。その代表的な結果を図-2に示す。飽和状態から始めた脱水過程と、十分に脱水した状態から実施した湿潤過程の水分曲線にヒステレ

シスが認められる。図-2中には、比較のために、原位置水分特性データもプロットしてある。その手順は次のようである：動態観測期間中に砂盛土から掘削サンプリングした試料に対して体積含水率を計測する；そして、その計測値を対応深度の観測サクシオン値に対してプロットすればよい。砂盛土動態の再現解析（後述）では、このような原位置水分特性データを重視して、水分保持モデル（式（1））の具体的なパラメータの値を決定した（図-2中のモデル曲線参照）。

（2）主要な動態観測結果

観測期間中の降雨強度の時刻歴を図-3(a)に示す。この間、台風0421号および台風0423号にともなう強雨イベント、秋雨前線による比較的強い降雨（2004年11月12日）、そして12月5日には師走異変（京都新聞、2004）

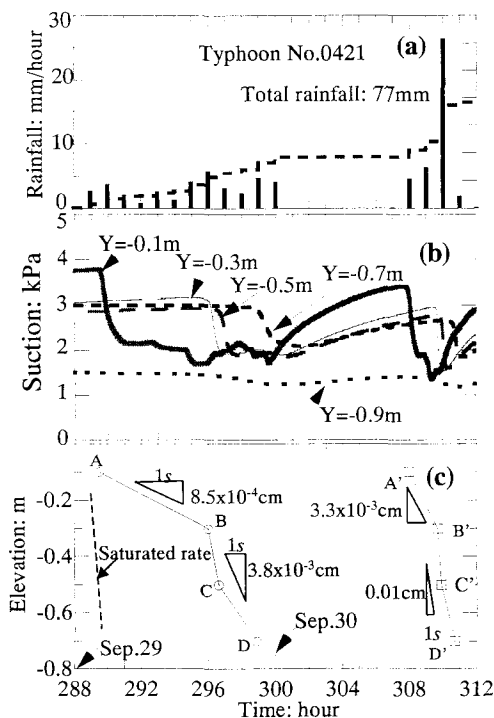


図-4 台風0421号来襲時の観測結果

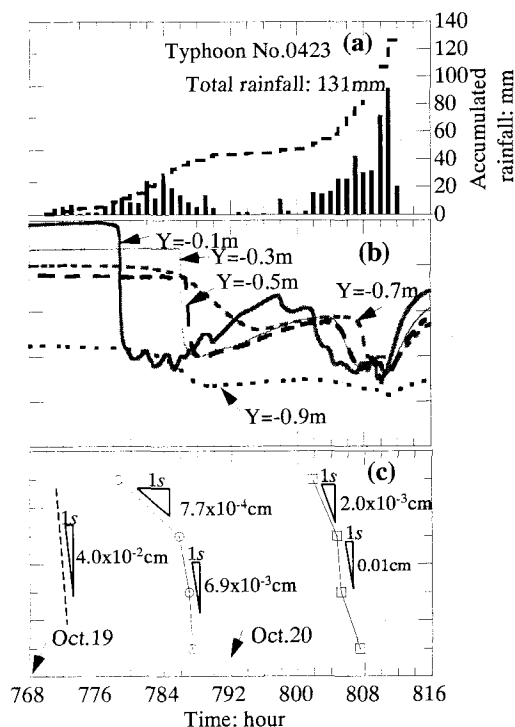


図-5 台風0423号来襲時の観測結果

にともなう強雨を観測した。この師走異変は台風27号（本土には上陸せず）の暖気と大陸側からの寒気の温度差による気象擾乱とされているが、実感としてはその特徴的な強風暖気の通過（台風並み）が印象的であった。それ以降、小雨が比較的高頻度で生じ、総じて wet な冬であった。

実降雨時刻歴に対応する砂盛土表層部（深度0.1 m）におけるサクシンの観測時刻歴を図-3(b)に示す。降雨イベントにともなうサクシンの低下と、その後の晴天期間中のサクシンの回復傾向が明らかである。降雨後の晴天期間が長いほど、サクシンの発達傾向が著しいことも明らかである。例えば、秋雨前線の影響（11月12日）を受けた後、師走異変（12月5日）までの期間では無降雨日が大半である。この間のサクシンの発達、観測期間中でも顕著であり、サクシン値は5 kPaを超えている。晴天がさらに長く続けば、サクシンがさらに発達する可能性もうかがわれる（この課題については後述の第4節で再びとりあげる）。

台風0421号来襲時の降雨特性と砂盛土内のサクシン応答の観測結果を図-4に示す。前線性の先行降雨が生じた後、暫時、降雨がおさまリ、その後台風本体の通過にともなう強い雨が降っている（図-4(a)）。図-4(b)によると、降雨開始後しばらくしてから砂盛土浅部（ $Y=-0.1\text{ m}$ ）のサクシンが急速に低下している。時

間の経過とともに、順次、深い位置のサクシンが急速な低下傾向を示しているが、これは降雨浸透にともなう浸潤フロント（wetting front）の降下を示唆している。図-4(c)は、この前提のもとに、浸潤フロントの刻々の位置を表わしている（曲線ABCD）。

次に、先行降雨後のサクシン応答に注目する。砂盛土の深部を除くと、降雨休止期間中のサクシンの回復傾向が明らかである。そして、台風本体の通過による強い降雨の浸透に対応して、再びサクシンは、砂盛土浅部より順次、時間遅れをともないながら急速な低下傾向を示している。その傾向を具体的に示したのが、図-4(c)中の曲線A'B'C'D'である。図中の線分A'B'の勾配は線分ABの勾配よりもかなり大きい。これは、先行降雨による飽和度の上昇をうけて透水係数の値が増加した効果であろう。

台風0423号来襲時のサクシン応答の観測結果を図-5に示す。定性的には、台風0421号来襲時の場合と同様なサクシン応答が観測されている。本ケースの場合にも、降雨浸透の影響を受けて顕著なサクシン低下を示していることは興味深い。

(3) 動態観測結果に対応した再現解析

上述の観測降雨時刻歴を入力として、砂盛土内のサクシン応答の再現解析(Case 1およびCase 2)を行った。Case 1では、透水係数の飽和度依存性を規定するパラ

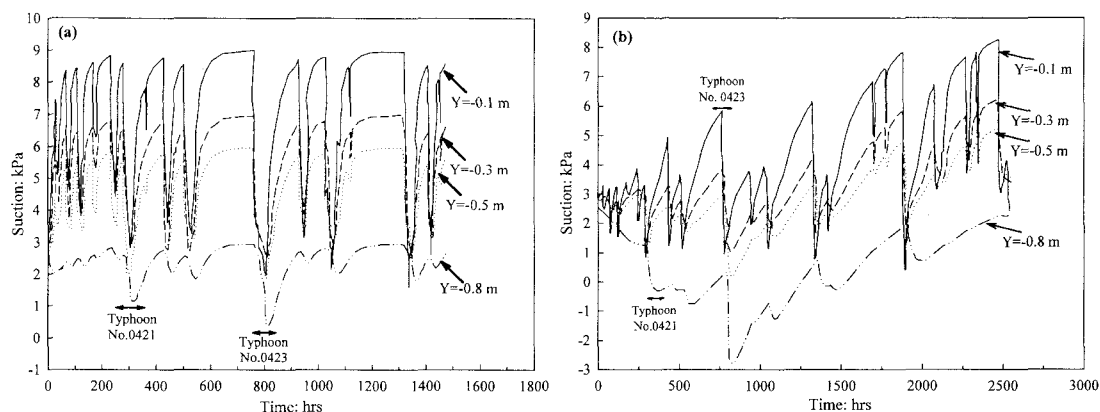


図-6 砂盛土内のサクシオンの消長に関する予測結果：(a) $l_w = 8.0$ の場合；(b) $l_w = 9.0$ の場合

メータ l_w の値を8.0とし、Case 2 ではその値を9.0に選定した。

解析条件 具体的な解析条件は次のようである。解析領域は、高さ100 cm、幅1 cmのコラムとし、100要素（厚さ1 cm、幅1 cm）に分割した。その際、高さ0～1 cmの1要素を防砂シート部に対応させ、高さ1～100 cmの99要素を砂地盤領域に対応させた。サクシオンと飽和度の初期分布は、観測開始時点の実測値を参考に設定した。実測降雨フラックスの時刻歴を解析領域の上面に入力した。降雨フラックスゼロ（無降雨）の時点には、同面は浸透ゼロ境界に対応する。その他の解析条件をまとめると、次のようになる。解析時間増分：10秒；解析対象時間：2ヶ月；側面境界条件：空気圧＝ゼロ、非排水；底面境界条件：空気圧＝ゼロ、サクシオン＝ゼロ。

透気係数の値は0.5 cm/sを採用した結果、実質的に間隙空気圧は砂盛土内でゼロ（大気圧に等しい状態）となった。砂盛土底面の防砂シート部の透気係数の値としては、0.000001 cm/sと小さく設定したが、これは盛土設置箇所における地表土が粘性土であったため、盛土下面からの実質的な排水能力は低いものと想定したことによる。

解析結果 砂盛土内の代表4深度におけるサクシオンの経時変化の予測結果を図-6(a), (b)に示す。Case 1の計算結果は、定性的には実測のサクシオンの消長をよく再現しているが、詳細にみると砂盛土浅層部のサクシオンを過大に予測する傾向がある。また、降雨後の晴天期間におけるサクシオンの回復過程が実測よりも早く収束する傾向がある（図-3 参照）。

他方、Case 2の計算結果によると、降雨後の晴天期間におけるサクシオンの回復速度は概ね実測の傾向を再現している。ただし、台風0423号イベントに対する計算結果では、砂盛土深部において負のサクシオン、すなわ

ち正の水圧が生じており、実測結果とは一致していない。台風0423号の来襲時には2日間の総降雨量が131 mmに達していたので、砂盛土底面からの排水能力の設定値が過小であった影響が端的に現れたものと考えられる。

以上の概観をふまえて、台風0423号来襲時における砂盛土内のサクシオン分布の経時変化の予測結果（Case 1）を図-7に示す。同図中には実測のサクシオン分布の経時変化も合わせて示してある。曲線1は経過時間778 hrsにおけるサクシオン分布を示す。この状態は、先行降雨にともなう浸潤フロントが深度-0.1 mに到達する直前の状態に当たる。曲線2は、その後8時間経過した状態であり、浸潤フロントの降下に対応するサクシオン低下の範囲を読み取ることができる。先行降雨が次第におさまるにつれて、地盤浅部のサクシオンはいったん回復傾向を示す（曲線3）。しかし、それに引き続く強雨の影響を受けてサクシオンは全体に顕著に低下する（曲線5）。実際、曲線5の状態は台風によるピーク降雨強度の状態にはほぼ対応する。実測では、その後、地盤全体にわたってサクシオンが急増ないしは微増している（曲線6）。ただし、解析による曲線6では、地盤深部においてさらにサクシオンが低下する傾向が認められる。この傾向は実測の傾向から逸脱するものであり、盛土底面の排水能力の設定における課題を浮き彫りにしている。

細部ではさらに改良の余地はあるものの、本解析結果は、実際面からも興味深い強雨イベント時における砂盛土内のサクシオンの消長パターンをよく再現していると見てよいであろう。

4. サキシオンの発達に及ぼす降雨後の長期晴天期間の影響

2004年には計10個の台風が上陸した（国立情報学研究所、2005）。気象現象における揺らぎは本質的なものであり、降雨頻度が少ない年の出現も十分に想定し得る。

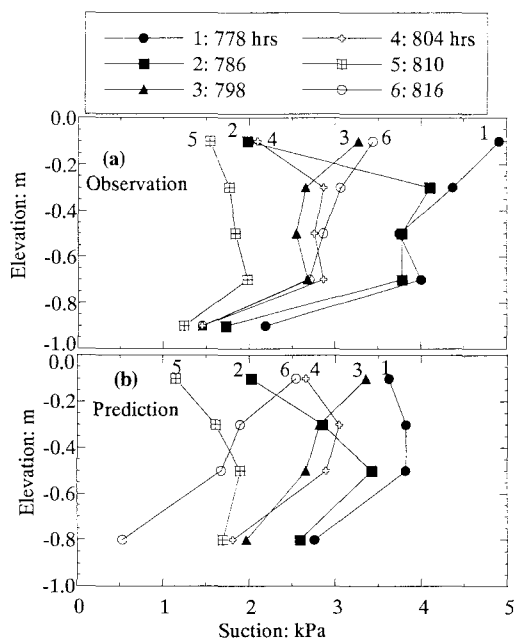


図-7 台風0423号時のサクシオン応答

砂浜地盤内の空洞保持にはサクシオンの消長が関与することから、サクシオンの発達に及ぼす降雨後の長期晴天期間の影響を評価することは実際的にも意義のあることと考えられる。本研究における動態観測は2004年9月からの7ヶ月間であったが、降雨頻度が多く、砂盛土のサクシオンは最大限可能なレベルまで発達していない。

そこで、仮想的に台風0421号の来襲以降に晴天期間が継続するとして予測解析 (Case 3) を実施した。用いたパラメータ l_w の値はCase 2と同様に9.0である。計算結果の一例を図-8に示す。具体的には、砂盛土内の代表4深度における全1500時間の期間におけるサクシオンの推移を示す。地盤の深部を除くと、サクシオンは降雨後直ちに回復し始め、晴天期間の持続とともに発達して行く。そして、本解析条件のもとでは、8週間前後ではサクシオンは頭打ちになる。

砂浜は感覚的には排水能力が高いと推察される。たしかに、表層1~2cm程度は普段からよく乾いており、降雨後にも直ぐに乾くようである。しかし、数十cmオーダーあるいはそれ以深の砂地盤内のサクシオンの応答になると、その消長を感覚的に推察することは困難である。図-8の予測結果は、砂浜地盤内におけるサクシオン場の推移が予想以上に長期にわたる可能性を示唆する

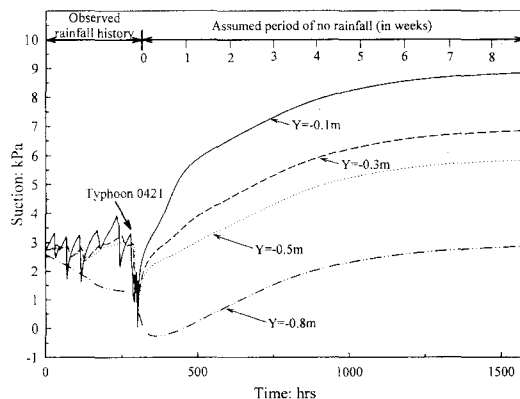


図-8 サクシオンの発達におよぼす晴天期間の影響 (予測結果)

ものである。今後、季節変動とイベントの両者を織り込んだ実砂浜でのサクシオン、水分移動の長期観測が望まれる。

5. ま と め

- (1) 厚さ1mの砂盛土に対して、2004年9月から7ヶ月間、動態観測を行った。その結果、設置したテンシオメータ鉛直アレイにより、台風0421号および台風0423号来襲時の特徴的な降雨パターンを反映した砂地盤内のサクシオンの消長を明瞭にとらえることができた。
- (2) 提案解析コード (Sassaら, 2005) に基づいて、降雨浸透にともなうサクシオンの時空間変動特性の特徴を再現することが可能となった。
- (3) 砂浜における降雨後のサクシオンの発達は、かなり長期間にわたる可能性がある。本解析の結果によると、サクシオンが最大限に発達するのに、概ね8週間を要している。今後、季節変動とイベントを織り込んだ実砂浜での長期観測による検証が望まれる。

参 考 文 献

- 京都新聞(2004): 2004年12月6日朝刊記事。
 国立情報学研究所(2005): デジタル台風: 台風リストビュー (<http://agora.ex.nii.ac.jp>).
 土木学会海岸工学委員会(2002): 大蔵海岸 陥没事故調査報告書。
 中野政詩・宮崎毅・塩沢昌・西村拓(1995): 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, pp. 74-76.
 Sassa, S., F. Li and H. Sekiguchi(2005): Response of saturated/unsaturated gravely sand to tidal fluctuations. In: Geotechnical Special Publication, No. 143, ASCE, pp. 174-186.