

護岸砂層内の空洞形成の数値シミュレーション

京都大学工学研究科 正会員 原田英治
 京都大学工学研究科 正会員 後藤仁志
 京都大学工学研究科 フェロー 酒井哲郎
 京都大学工学部 学生員 ○鄭 知博

1. はじめに

平成13年12月30日、兵庫県明石市大蔵海岸の人工海浜において発生した砂浜の陥没事故は記憶に新しい。土木学会海岸工学委員会の大蔵海岸陥没事故調査委員会によって、自然条件の解析、各種現地観測の結果、さらには、水理模型からの工学的知見に基づいた陥没事故の原因の解明が進められ、「大蔵海岸 陥没事故調査報告書」にまとめられた。報告書では、来襲する波浪による往復運動を繰り返すうちに、ケーソン目地部に挿入された砂防板が、背後の砂および雑石との摩擦により摩擦破損し、来襲波の引き波時に、破損箇所から砂浜部の砂が吸出されたことが陥没の発生の主たるメカニズムであるとの分析が示されている。砂の吸出しによって砂浜下に空洞が形成され、波の作用によって徐々に空洞が大きく成長する。そして、地盤の自重と被災者の体重による荷重が、空洞を保持している砂粒子間のサクシオンおよびアーチ作用等の自立強度を超え、空洞が崩壊し地盤が陥没したと考察されている。しかしながら、砂防板が破損していても空洞や陥没が確認されていない箇所も存在し、どのような状況で空洞が発生し成長するかは詳細には把握されていない。また、空洞の規模や位置および地盤条件が、陥没発生に及ぼす影響についても、現状では十分な知見が無く、検討が望まれる。

ところで、空洞は砂粒子間に作用するサクシオンおよびアーチ作用等の砂粒間相互作用力により保持され、複雑な三次元構造を呈していることに鑑みると、砂粒子間の相互作用を記述できる三次元モデルが、空洞形成機構の本質的解明には必要不可欠であることは言うまでもない。しかし、これまでそれらを考慮したモデルを用いた数値シミュレーションには例が無い。そこで、本研究では、砂粒子間相互作用が様に表現できる三次元個別要素法を基礎とした粒状体モデルを用いて、砂の吸出しによる砂層内の空洞形成の数値シミュレーションを実施する。一連のシミュレーションを通じて、空洞の成長過程を再現するとともに、空洞形成機構の一端について検討する。さらに、砂粒子間に作用するサクシオンのレベルによる空洞形成過程の違いについて言及する。また、接触粒子間力を表示し、空洞周辺地盤の内部構造についても推定する。

2. シミュレーション概要

計算に用いたモデルは、三次元個別要素法を基礎とした粒状体モデルである。粒状体モデルで用いる計算時間ステップは、 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}(\text{s})$ であり、モデル定数を法線方向バネ定数 $k_n = 129.19(\text{N/s})$ 、接線方向バネ定数 $k_s = 49.69(\text{N/s})$ 、法線方向粘性定数 $c_n = 0.29(\text{Ns/m})$ 、接線方向粘性定数 $c_s = 0.18(\text{Ns/m})$ のように設定した。計算領域を図-1に示す。砂地盤は、粒径 $d_1 = 0.006(\text{m})$ 、 $d_2 = 0.005(\text{m})$ の二粒径混合状態であり、各粒径階の粒子がほぼ一対一の体積比率で一様に混合されるようにランダムにパッキングを行って、初期配列を決定している。なお、比重は両粒径階共通で2.65である。砂地盤構成粒子数は60000個、固定壁粒子数は27768個で、総粒子数87768個となっている。また、固定壁は最大粒径程度の凹凸を有する粗面である。

パッキング終了後、底の固定壁の一部が取り除かれて、吸出し口が形成される。吸出し力によって砂粒子が吸出し口から流出し、砂地盤に空洞が形成されていく。砂地盤に作用する吸出し力を適切に評価するには、波と砂地盤の相

キーワード：個別要素法、粒子間相互作用力、サクシオン、アーチ作用

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学工学研究科 土木工学専攻

TEL: 075-753-5099 FAX: 075-761-0646

相互作用を見積る必要があるが、ここでは、砂地盤内の空洞形成過程に焦点を当て、吸出し力の評価は簡便なものとした。吸出し力の作用範囲は、初期の吸出し点 z_c を中心とした半径 L_z （吸出し力の影響半径）の球内部であり、作用力は、重力の0.1倍の力が、 z_c からの距離に反比例して y 軸負方向に作用する。なお、吸出しによる空洞発達に伴い、 z_c は、 y 軸正方向へ側壁面上を沿って辿り、形成した空洞の最大 y 座標までシフトするが、 z_c の上限値は L_{limit} までとし、 z_c が上限値に到達すると、 z_c の上昇移動は停止する。

砂地盤が不飽和状態にあるとき、砂粒子間の空隙に含まれている水分が負の間隙水圧（サクシオン）を保持し、見かけの粘着力が砂粒子間に発生するので、砂地盤は変形し難くなる。ここでは、サクシオンは砂粒子間の引っ張りに対する抵抗力で模擬した。

3. シミュレーション結果

図-2、図-3にそれぞれサクシオン無し、サクシオン有りの最終形状のスナップショットおよび粒子間作用力の分布を示す。なお、空洞が見易いように、固定壁は削除して表示した。また、粒子間に作用する力の分布は、大きい力が作用するほど濃色で表示した。サクシオンが無い場合は、砂地盤に発生した空洞が発達して砂地盤表層が陥没するが、サクシオンがある場合は、砂地盤内に空洞を形成するものの、空洞と砂地盤の境界に強い力が作用するアーチ作用が見受けられ、砂地盤表層の陥没を抑制している。この点が、サクシオンの有無による大きな違いである。サクシオンが有る場合の断面図に注目すると、空洞上部に楔状砂粒子塊が確認できる。また、楔状砂粒子塊と背後の砂地盤との間には、すべり線（図中に破線で示した）が発生しており、空洞周辺地盤上の地盤強度の低下が推定される。さらに、粒子間作用力の分布でも、すべり線付近では、粒子間の作用力が小さくなっており、砂地盤表層の陥没までには至っていないが、空洞上方の地盤が容易に陥没に至る状態にあることを裏付けている。

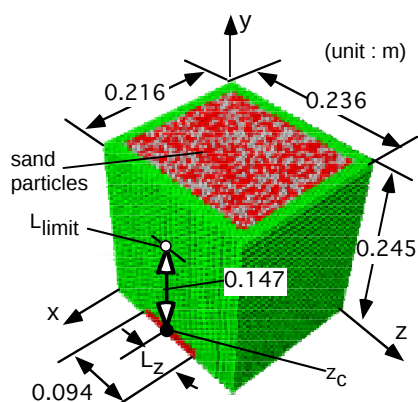


図-1 初期配列

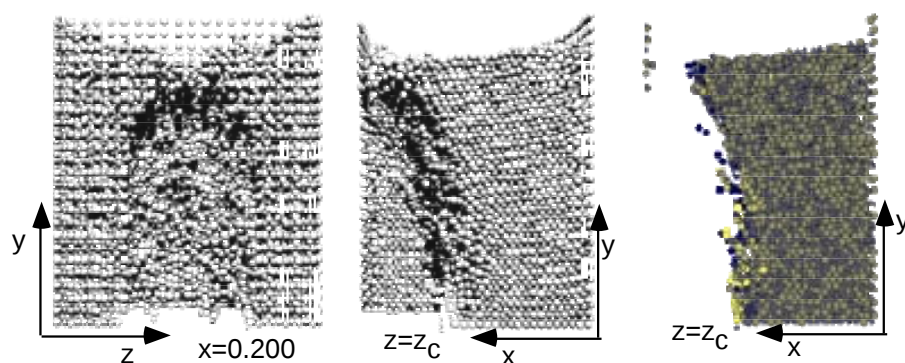


図-2 サクシオン無しの場合の空洞
スナップショット：正面（左）、断面（中）；力の分布（右）

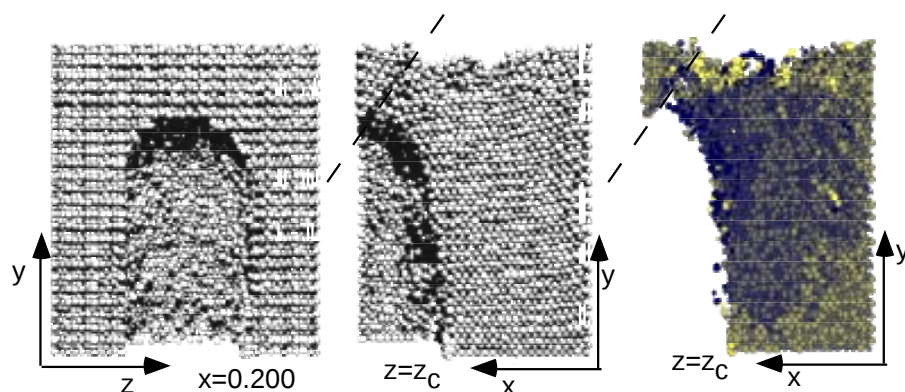


図-3 サクシオン有りの場合の空洞
スナップショット：正面（左）、断面（中）；力の分布（右）