

|           |      |        |
|-----------|------|--------|
| 京都大学工学部   | 学生員  | ○ 鄭 知博 |
| 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   |

**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、砂浜が陥没し、少女が生き埋めとなる事故が発生したことは、記憶に新しい。急遽、土木学会海岸工学委員会は、大蔵海岸陥没事故調査委員会を発足させ、事故の原因究明にあたった。委員会の調査によると、事故の原因は、来襲する波浪による往復運動から生じる水位差によってケーソン目地部に挿入された砂防板が破損し、そこから引き波時に砂浜部の砂が吸出され、空洞が形成されたことによると報告されている。空洞が発達して、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及びアーチ作用等の自立強度を凌駕し、地表面付近の地盤が陥没し崩壊に至ったと推定されている。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あり、どのような条件で空洞が発生し成長するか、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、現在のところ十分な知見は無く、今後の検討が望まれる。

ところで、吸い出し災害に関する既往の研究の主流は、室内模型実験を対象とした検討であり、数値シミュレーションは二次元場を対象とした検討が若干ある程度である。しかしながら、空洞形成過程の詳細な議論には、空洞が複雑な形状を呈していることや、空洞がサクシオンやアーチ作用等に起因した砂粒子間に作用する接触力によって保持されている事実を鑑みると、三次元場で、しかも、粒子間相互作用力を表現できるシミュレーションによるアプローチが有効であることは言うまでもない。

そこで本研究では、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における空洞形成過程の数値シミュレーションを行う。さらに、接触粒子間力を表示し、空洞周辺地盤内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** モデル定数については、個別要素法型の粒状体モデルで用いる計算時間ステップ  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$  (s) に対して、法線および接線方向のバネ定数および粘性定数をそれぞれ  $k_n$  : 129.19(N/s),  $k_s$  : 49.69(N/s),  $c_n$  : 0.29(Ns/m),  $c_s$  : 0.18(Ns/m) に設定した。砂地盤を構成する粒子は、粒径  $d_1$  : 0.006(m),  $d_2$  : 0.005(m) の 2 粒径混合状態(比重は、両粒径階共通で 2.65)であり、各粒径階の粒子がほぼ 1 対 1 の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、個々の粒子の初期配列を決定した。砂地盤構成粒子数は 60000 個( $d_1$  : 30115 個,  $d_2$  : 29885 個), 固定壁粒子数は  $d_1$  : 27768 個で、総粒子数 87768 個である。また、固定壁は最大粒径程度の凹凸を有する粗面である。計算領域を図-1 に示す。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。波浪による砂地盤に作用する吸出し力を適切に評価するためには、波と砂地盤の相互作用を考慮する必要があるが、ここでは、砂地盤内の空洞形成過程に焦点を当て、吸出し力の模擬は簡便なものとした。吸出し力作用範囲は、初期の吸出し点、 $z_0$  を中心とした半径  $L_z$  (吸出し口の幅)の球内部であり、作用力は、重力の 0.1 倍の力が、 $z_0$  からの距離に反比例して  $y$  軸負方向に作用する。なお、吸い出しによる空洞発達に伴い、 $z_0$  は  $y$  軸正方向へ側壁面上を沿って通り、形成した空洞の最大  $y$  座標までシフトするが、 $z_0$  の上限値は  $L_{\text{limit}}$  までとし、 $z_0$  が上限値に到達すると、 $z_0$  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る水分が負の間隙水圧(サクシオン)を有し、

見かけ上の粘着力が砂粒子間に発生する。本論文では、砂粒子間のサクシオンを砂粒子同士の引っ張りに対する抵抗力を計算に組み込む事で模擬し、シミュレーションは、サクシオンの有無による 2 ケースを実施した

**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が無い場合と有る場合における空洞の最終形状のスナップショットおよび粒子間に作用する力の分布を示しておく。また空洞を明瞭に見るために、固定壁及びバックキグ終了後の位置から一定距離移動した粒子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につれて濃色で表示した。

サクシオンが無い場合は、砂地盤に発生した空洞は安定せず発達を続け、ついには砂地盤表面を貫通する。一方サクシオンが有る場合は、砂地盤内の空洞の発達は進行していくものの、粒子がアーチ状の構造を形成して、砂地盤表層の陥没を防いでいる。断面図に注目してみると、空洞上部に楔状砂粒子塊が確認できる。また、楔状砂粒子塊と裏込め土との間にはすべり線が見られ、空洞上部の表面付近の地盤強度は弱いと考えられる。さらに力の分布からも、すべり線付近の粒子間の力は小さいことがしめされ、地盤表層は陥没するには至っていないが、地盤強度が弱く陥没し易い脆弱な地盤構造であると考えられる。

**4.おわりに** 三次元個別要素法に基づく粒状体モデルによる地盤内の空洞化のシミュレーションを実施し、空洞の形状および空洞周辺地盤に作用する力の分布を検討した。本研究のシミュレーションによって、簡便な吸出し力の作用下ではあるが、地盤の性質による空洞の形状特性の一端を示した。今後は、相似則などを検討して、室内模型実験と比較しつつ定量的な評価を目指し、さらに、空洞形成のメカニズムの把握に努めたい。

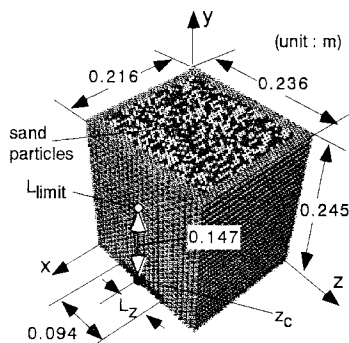


図-1 計算領域

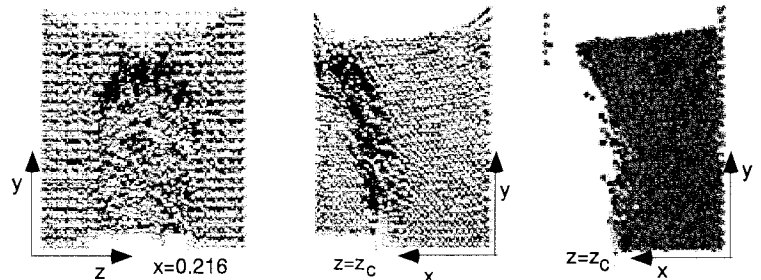


図-2 サクシオン無しの場合の空洞

スナップショット：正面(左), 断面(中)；力の分布：断面(右)

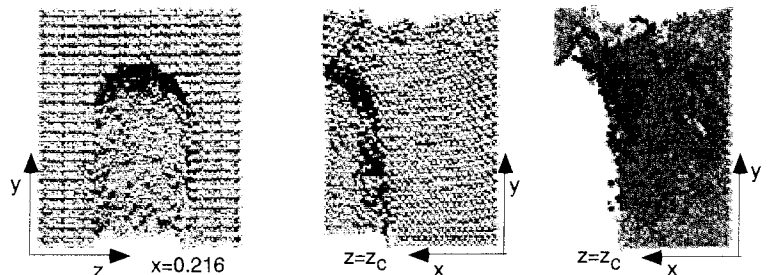


図-3 サクシオン有りの場合の空洞

スナップショット：正面(左), 断面(中)；力の分布：断面(右)