

京都大学工学部 学生員 ○岩本晃幸
 京都大学工学研究科 フェロー 酒井哲郎
 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 正会員 原田英治
 京都大学工学研究科 学生員 許 伶宅

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り死亡した痛ましい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は、自然現象の解析、各種現地観測結果、さらには水理模型実験からの工学的知見に基づいた陥没事故の原因説明を押し進めて、「大蔵海岸 陥没事故調査報告書」(<http://www.jsce.or.jp/committee/cec/> 参照)にまとめた。ここでは、①縮尺1/10の模型を用いて、砂地盤内に埋設された水道管が砂の吸出しによる空洞の発達に与える影響を確認するための追加実験および②水道管等が空洞の保持に与える影響を把握するために実物大実験が実施されている。本研究では、「水道管等による空洞保持に関する検討」で実施された室内実験を対象に、個別要素法を基礎とした粒状体モデルによる数値シミュレーションを実施し、砂地盤に埋設された水道管が空洞成長過程に与える影響について計算力学的に検討する。

2.シミュレーションモデルの概要 砂粒子の運動は、砂粒子間衝突を陽に取り扱えることができる3次元個別要素法型のモデルによって記述した(後藤ら, 2002)。ここでは、砂粒子相互作用力は、接平面内2成分と法線方向1成分についてバネ-ダッシュポットモデルを導入して記述する。また、砂地盤が不飽和状態である場合、砂粒子間含有水分の負の間隙水圧(サクション)による見かけの粘着力が発生し、砂地盤は変形し難くなるが、ここでは、サクションの効果を砂粒子間の引っ張り抵抗としてモデル化した。

3.計算条件 計算領域及びトリガーをそれぞれ図-1及び図-2に示す。砂地盤は粒径 $d=5\text{mm}$ 、比重 $\sigma=2.65$ の均一粒子が、固定境界粒子の初期配置条件下において、できるだけ最密に充填されるように初期配置を設定した。固定境界粒子(側壁および水道管)の粒径および比重は砂粒子と同一であり、粒径程度の粗度を有する。計算対象領域での構成粒子数は砂地盤:58212個、側壁:8961個、水道管:60個で、総粒子数は67233個である。なお、水道管の位置およびパッキング操作(重力のみの作用下で安定した粒子配置を形成する過程)後の砂地盤高さは「水道管等による空洞保持に関する検討」(<http://www.jsce.or.jp/committee/cec/> 参照)で報告された縮尺1/10の模型を用いた室内実験の諸値を満足するように決定した。なお水道管の直径は5mmとした。パッキング操作後の安定した砂地盤に対して、固定壁の一部を取り除き、吸出し口を形成するとともに、吸出し口付近の一部の砂粒子塊約1000個を瞬間的に取り除く操作によって、空洞形成のトリガーとし、その後、重力の作用下における砂地盤中の空洞の成長過程を追跡する。この空洞成長のトリガーは波の直接作用によって砂地盤内に形成される空洞が、砂地盤下層の一部の領域であり、それがトリガーとなって空洞の成長が進行することを考慮した操作である。また本シミュレーションで使用したモデル定数は、個別要素法で用いる計算ステップ $\Delta t=1.0\times 10^{-4}\text{s}$ に対して、後藤ら(2001)の設定法に準拠して、 $k_n=50.24\text{N/s}$ 、 $k_s=19.32\text{N/s}$ 、 $c_n=0.20\text{Ns/m}$ 、 $c_s=0.18\text{Ns/m}$ のように設定した。なお、サクションによる見かけの粘着力を規定する係数は、追加実験報告書の実験結果で示された砂地盤内に形成された空洞高さが良好に再現されるように、 $\alpha=0.011$ とした。

4.空洞成長過程 水道管の存在の有無に関係なく、空洞形成のトリガーをひいた直後から瞬間的に不安定化した砂粒子が塊となって剥落し、吸出し口の直上に砂地盤の不安定領域が形成され、その後、断続的に規模の小さい砂粒子の剥落による空洞の成長が確認される。また、空洞成長の終局時には、空洞の断面はアーチ

Tetsuo SAKAI ,Hitoshi GOTOH ,Eiji HARADA ,Yong Teck HUR and Teruyuki IWAMOTO

状の形状を呈し続けるが、このアーチ状の断面形状は、粒子間力及びサクシンの効果によって保持されていると推察される。シミュレーション結果は、水道管の有無によって空洞の最終形状に至るまでに要する時間に差が確認されるものの、空洞の最終形状に至るまでの空洞成長過程及び終局時の空洞の断面形状は、水道管の有無によらず類似した成長過程の傾向を示しており、追加実験報告書の見解と一致していると言えよう。水道管の存在の有無による不飽和砂地盤の空洞成長過程をスナップショットを用いてそれぞれ図-3及び図-4に示す。次に、空洞成長を比較するために「水道管等による空洞保持に関する検討」により示された実験結果及びシミュレーション結果をプロットしたものを図-5に示す。シミュレーション結果は、奥行き方向の空洞の成長が、実験結果と比較して僅かに小さいものの、シミュレーション結果は実験結果を良好に再現し、三次元個別要素法モデルのこの種の問題への適応が確認できた。

5. 結論 本研究では、個別要素法を基礎にした粒状体モデルに、砂粒子間のサクシンによる粘着性を考慮したコードを用いて、水道管が埋設された護岸隣接砂層内における空洞の成長過程の数値シミュレーションを実施した。空洞の成長過程を明らかにするとともに、「水道管等による空洞保持に関する検討」で報告された室内実験の結果を数値シミュレーションによって再現した。今後、実験では得難い空洞内部の砂粒子間の分布等を評価し、空洞形成機構を詳細に検討したい。

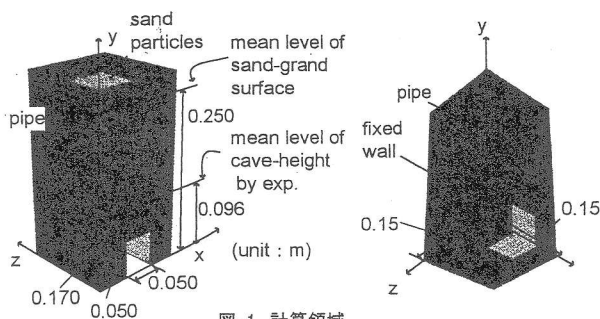


図-1 計算領域

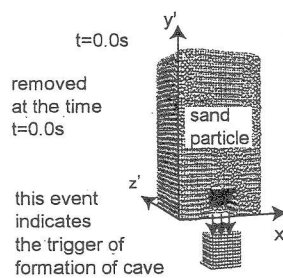


図-2 トリガー

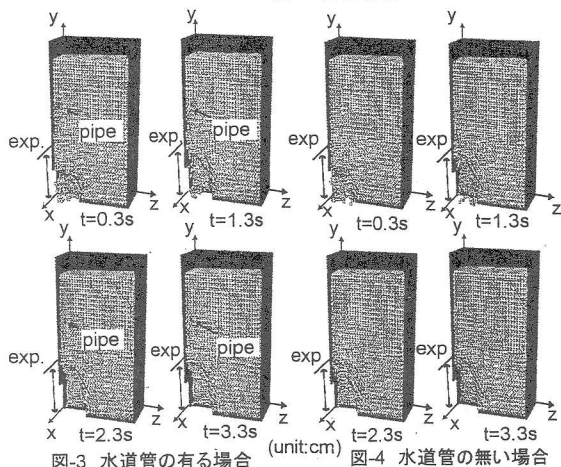


図-3 水道管の有る場合 (unit:cm)

図-4 水道管の無い場合

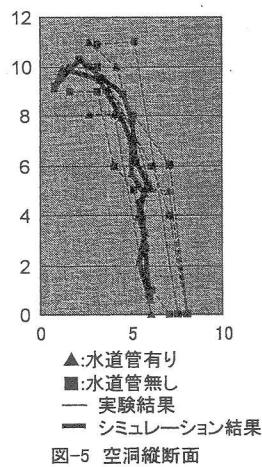


図-5 空洞縦断面

参考文献

- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎(2001): 個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp.101-112.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎(2002): 三次元個別要素法による数値移動床の一般化, 水工学論文集, 第49巻, pp.613-618.
- 土木学会海岸工学委員会 大蔵海岸陥没事故調査小委員会(2003): 水道管等による空洞保持に関する検討
- 土木学会海岸工学委員会 大蔵海岸陥没事故調査小委員会(2003): 水道管等による空洞保持に関する検討