

波浪による護岸隣接砂層内の空洞成長過程の 3D シミュレーション

原田 英 治*・後藤 仁 志**・酒 井 哲 郎***・鄭 知 博****

人工海浜では、護岸背後の砂浜部の砂が波浪によって吸出され、護岸背後で空洞化が進行し、砂地盤が沈下・陥没する被災事例が報告されている。しかし、空洞化の進行過程についての理解は、必ずしも充分ではない。本稿では、3次元個別要素法を基礎とした粒状体モデルを用いた数値シミュレーションによって、空洞の成長過程を詳細に示し、空洞形成機構を計算力学的に検討した。さらに、空洞形成過程における地盤の内部構造を粒子間の接触力の観点から検討し、空洞の成長が周辺地盤に及ぼす影響を明らかにした。

1. 緒 言

人工海浜では、護岸背後に埋め立てられた砂地盤が波浪の外力によって防砂板の亀裂等の護岸の隙間を通じて吸い出され、護岸背後の砂層内に形成された空洞が成長して、砂層の沈下・陥没を誘発する事例が報告されている。

護岸背後の沈下・陥没災害のメカニズムについて、これまで多くの研究があるが、それらは変動水圧による土砂の流出（吸出し）過程を検討したものであり（例えば、高橋ら、1996；重村ら、2002；前野ら、2002）、砂層内の空洞発達過程を主対象とした議論はなされてない。2001年の兵庫県大蔵海岸での陥没事故後の調査（土木学会海岸工学委員会、2002）によって、護岸背後の砂地盤内の空洞の存在が注目され、空洞形成機構に関する研究（例えば、鳥居・福濱、2002；陳ら、2002）は進められているものの、定量面あるいは予測面では必ずしも充分とは言えない。

空洞形成機構の基本的な理解には、空洞の3次元構造や空洞周辺地盤の支持力の空間分布の時間発展過程の理解が必要であること、また、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子間相互作用により保持され、複雑な3次元構造を呈していることを考慮すると、砂粒子間の相互作用を記述できる3次元モデルを用いた数値シミュレーションが、空洞形成機構の本質的解明に対して有益であることは明らかであろう。

そこで、本稿では砂粒子間相互作用力が陽に表現できる3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過程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形成プロセスを示すとともに、不飽和地盤のサクシオンの効果が空洞の形成過程および発達後の形状に及ぼす影響についても言及する。さらに、3次元モデルの長所を活かして、実験では把握が困難な空洞周辺地

盤の内部構造を砂粒子間力の観点から詳細に議論する。

2. シミュレーションモデル

（1）モデルの構成

砂粒子の運動は、砂粒子間衝突を陽に取り扱える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）。砂粒子 i の並進および回転の運動方程式は、

$$\sigma A_3 d_i^3 \frac{d\mathbf{u}_{pi}}{dt} = \mathbf{F}_{pint} + \mathbf{F}_{gr} \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{F}_{gr} = -\sigma A_3 d_i^3 \mathbf{g} \dots\dots\dots (2)$$

$$\mathbf{T}_i = \frac{\sigma \pi d_i^5}{60} \frac{d\boldsymbol{\omega}_{pi}}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

と書ける。ここに、 $\mathbf{F}_{pint}$ ：砂粒子間相互作用ベクトル、 $\mathbf{F}_{gr}$ ：重力ベクトル、 $\mathbf{u}_{pi}$ ：砂粒子 i の移動速度ベクトル、 A_3 ：砂の3次元形状係数（球を想定し $A_3 = \pi/6$ ）、 d_i ：砂粒子 i の直径、 σ ：砂粒子密度、 $\mathbf{g}$ ：重力加速度ベクトル、 $\mathbf{T}_i$ ：砂粒子 i に作用するトルク、 $\boldsymbol{\omega}_{pi}$ ：砂粒子 i の回転速度ベクトルである。砂粒子間相互作用力は、図-1に示すローカル座標系（ ξ, η, ζ ）において接平面内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。砂粒子 i, j の接平面には、法線（ ξ 軸）方向および接平面（ η 軸および ζ 軸）方向に弾性スプリング（バネ定数 k_n, k_s ）およびダッシュポット（粘性定数 c_n, c_s ）を配置して相互作用を表現する（図-1参照）。なお、本シミュレーションでは、砂粒子間の接平面に生じる法線方向まわりの回転に対するねじりモーメントは考慮していない。法線方向力（ F_ξ ）と接線方向（ F_η, F_ζ ）は、

$$\left. \begin{aligned} F_\xi(t) &= e_n(t) + d_n(t) \\ e_n(t) &= e_n(t - \Delta t) + k_n \cdot \Delta \xi_i \\ d_n(t) &= c_n \cdot \Delta \xi_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} F_\eta(t) &= e_{s\eta}(t) + d_{s\eta}(t) \\ e_{s\eta}(t) &= e_{s\eta}(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta \eta_i \\ d_{s\eta}(t) &= c_s \cdot \Delta \eta_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} F_\zeta(t) &= e_{s\zeta}(t) + d_{s\zeta}(t) \\ e_{s\zeta}(t) &= e_{s\zeta}(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta \zeta_i \\ d_{s\zeta}(t) &= c_s \cdot \Delta \zeta_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

* 正 会 員 工博 京都大学助手 工学研究科都市社会工学専攻
** 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
*** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻
**** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻

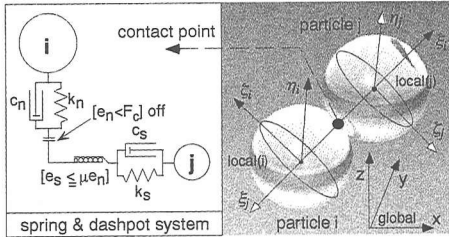


図-1 ローカル座標系

と評価される。ここに、 e_n 、 e_s ：法線、接平面におけるバネによる抗力、 d_n 、 d_s ：法線、接平面におけるダッシュポットによる抗力である。なお、式中の「 $\cdot$ 」は時間微分を示す。

(2) サクシジョンのモデル化

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（サクシジョン）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、サクシジョンの効果を砂粒子間の引張り抵抗としてモデル化した。不飽和砂地盤のサクシジョンの効果は、法線(ξ 軸)方向に、引張り限界 F_c まで抵抗するジョイント

$$F_\xi(t)=0 \quad \text{when} \quad e_n(t) < F_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F_c = -\alpha \cdot k_n \cdot d_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

接平面 (η 軸および ζ 軸) 方向に一定の限界を超える力が作用すると滑動するジョイント

$$F_\eta(t) = \mu \cdot \text{SIGN}(e_n(t) + F_c, e_{\eta\eta}(t)) \\ \text{when } |e_{\eta\eta}(t)| > \mu(e_n(t) + F_c) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$F_\zeta(t) = \mu \cdot \text{SIGN}(e_n(t) + F_c, e_{\zeta\zeta}(t)) \\ \text{when } |e_{\zeta\zeta}(t)| > \mu(e_n(t) + F_c) \quad \dots\dots\dots (10)$$

を配置して表現した。ここに、 F_c ：粘着の効果を表す力、 α ：引張りレベルを規定する係数、 μ ：接触点における動摩擦係数 ($\mu=0.577$)、 $\text{SIGN}(a, b)$ は、 $|a|$ に b の符号を付けることを意味する。

(3) 計算条件

計算領域を図-2に示す。本シミュレーションでは、サクシジョンによる見かけの粘着力を規定する係数を $\alpha=0.005$ に設定した。また、砂地盤は、砂粒子径 $d_1=6$ mm、 $d_2=5$ mm の2粒径混合状態であり、各粒径階の砂粒子がほぼ同一の体積比率で一緒に混合されるようにランダムに配置し初期配列を決定した。なお、比重は両粒径階共通で2.65であり、計算対象領域での砂地盤構成粒子数は60,000個、固定壁粒子数は27,768個で、総粒子数87,768個である。また、固定壁は最大粒径 d_1 程度の粗度を有する粗面である。シミュレーションは、初期配列後のパッキング操作で安定した砂地盤に対して、固定壁の底面の一部を取除き、吸出し口を形成するとともに、吸

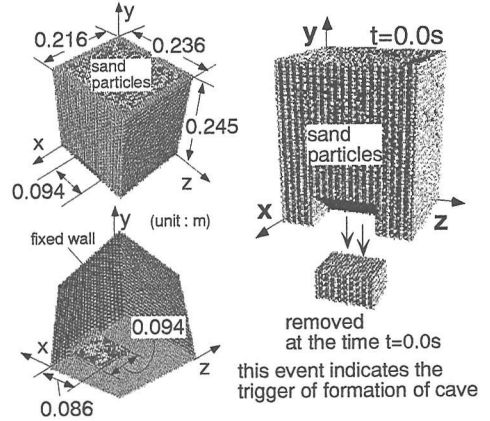


図-2 計算領域

出し口付近の一部の砂粒子塊約2,000個を瞬間的に取除く操作(図-2参照)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約100秒間追跡する。この空洞形成のトリガーは、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。もちろん、砂地盤に作用する吸出し力を適切に評価するには、波と砂地盤の相互作用を見積る必要があるが、本研究では空洞成長過程に焦点を当てることとし、波浪による吸出し力の詳細なモデル化は実施していない。また、モデル定数は、個別要素法で用いる計算時間ステップ $\Delta t=1.0 \times 10^{-4}$ s に対して、後藤ら(2001)の設定法を参考にして、 $k_n=129.19$ N/s、 $k_s=49.69$ N/s、 $c_n=0.29$ Ns/m、 $c_s=0.18$ Ns/m のように設定した。

3. シミュレーション結果

(1) 空洞成長過程

不飽和砂地盤の空洞の成長過程をスナップショットを用いて図-3に示す。なお、空洞表面の形状の見易さに留意して、パッキング終了時の座標からの相対変位が最大粒径 d_1 の10倍以上になる砂粒子は非表示とした。この操作により空洞内を落下中に粒子が消えるので、落下粒子の背後にある空洞表面が見易くなる。空洞の陰影から、空洞が複雑な3次元構造を有していることが明瞭に理解できる。空洞形成のトリガーを引いた直後から、瞬間的に不安定化した砂粒子が塊となって剝落し、吸出し口の直上に大きな空洞が形成される。その後、時刻 $t=20.0$ s 付近までは、顕著な空洞の成長は確認されないが、時刻 $t=23.5-26.5$ s および時刻 $t=36.0-37.0$ s で、図に示す様に側壁に沿った規模の小さい砂粒子の剝落による空洞の成長が断続的に確認された。時刻 $t=30.0$ s 付近まで

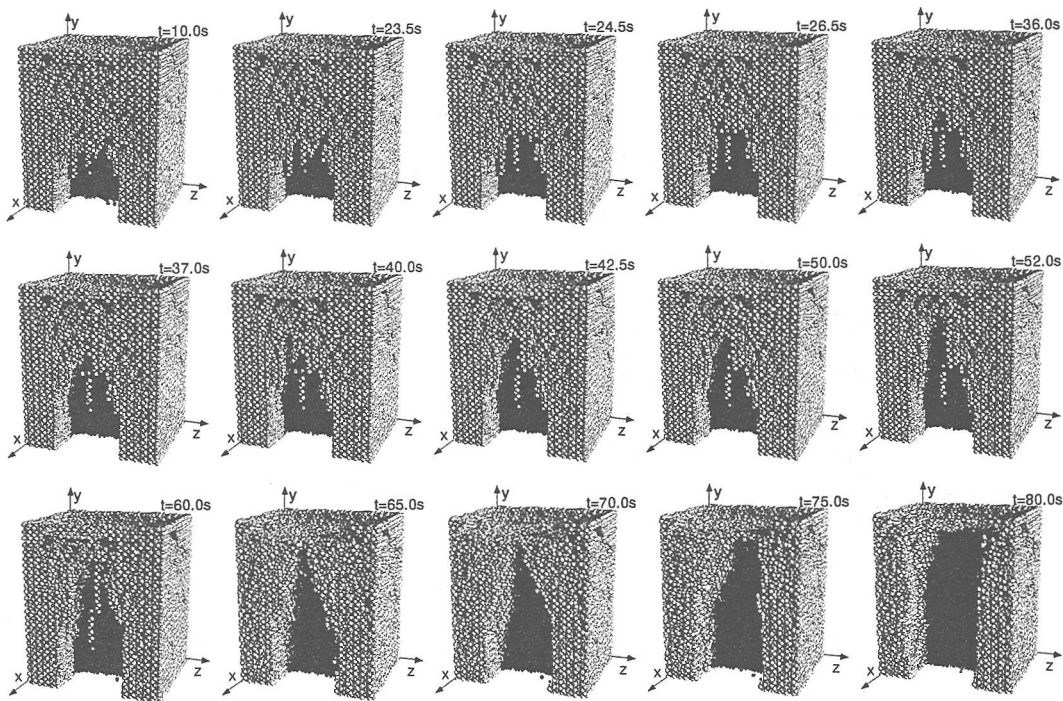


図-3 空洞成長過程のスナップショット

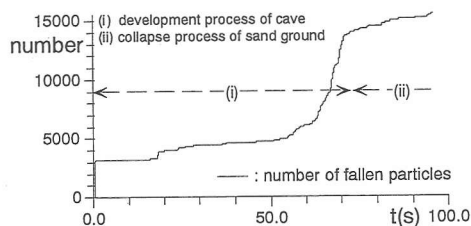


図-4 剥落砂粒子数の時系列

は、空洞は円筒を伸ばすように、主として上方 (y 軸正方向) に向かって発達し、時刻 $t=40.0$ s 以降は、空洞の発達が徐々に鈍化して空洞の先端が尖った形状を呈する。また、空洞は上方に向かって細長く伸びるように成長しつつも、その影響域を拡大し、時刻 $t=60.0$ s 付近に達すると、砂層表層に空洞が貫通し、砂地盤がすり鉢状に陥没の様子が示されている。

定量的に空洞の成長過程の規模を評価するために、吸出し口よりも下方 ($y_c < 0.0$ m) へ剥落した累積砂粒子数の時系列を図-4に示す。時刻 $t=0.0$ s で吸出し口が形成された後、約 0.6 秒の短時間に 3,000 個余りの砂粒子が剥落しており、吸出し口の上部の大規模な空洞の程度が明瞭に理解できる。その後、暫くの間、空洞は安定な状態に落ち着き、時刻 $t=15.0$ s 付近まで、際立った剥落砂粒子の増加は確認されないが、時刻 $t=15.0$ - 20.0 s の

間には、小規模な階段状の増加を繰り返しており、大小様々の規模の砂粒子の剥落が継続的に発生している状況が示されている。時刻 $t=25.0$ - 50.0 s 付近には、小規模な剥落と 5.0 秒程度の比較的短時間の空洞安定状態をほぼ一定の間隔で繰り返す (等幅の小段が見られる) が、顕著な空洞の成長は無く、空洞の成長が穏やかに進行する様子が示されている。その後、時刻 $t=60.0$ s を過ぎたところで、剥落砂粒子数は急増に転じる。時刻 $t=50.0$ - 70.0 s の時間帯は、空洞が砂層上層に向かって成長し、砂地盤を貫通する過程であり、図-3のスナップショットの空洞の成長過程からも剥落砂粒子の増加が確認できる。このように、砂地盤内の空洞の成長過程は単調に進行するのではなく、休止過程を有する間欠的な砂粒子の小規模剥落による空洞の漸变的成長過程と、剥落砂粒子数の急増によって空洞の成長が加速する急変過程から成っており、空洞の成長過程が強い非定常性を有することが伺える。空洞が砂地盤表層に達する時刻 $t=70.0$ s 以降は、剥落砂粒子数の増加率が減少しているが、このことは、砂地盤表層の陥没口の拡大が徐々に進行していることに対応すると考えられる。

(2) 空洞周辺地盤の内部構造

本モデルは3次元モデルである故に、任意の断面での空洞周辺地盤の構造を表示することが可能である。その一例として、時刻 $t=36.1$ - 36.7 s における xy 平面 ($z=$

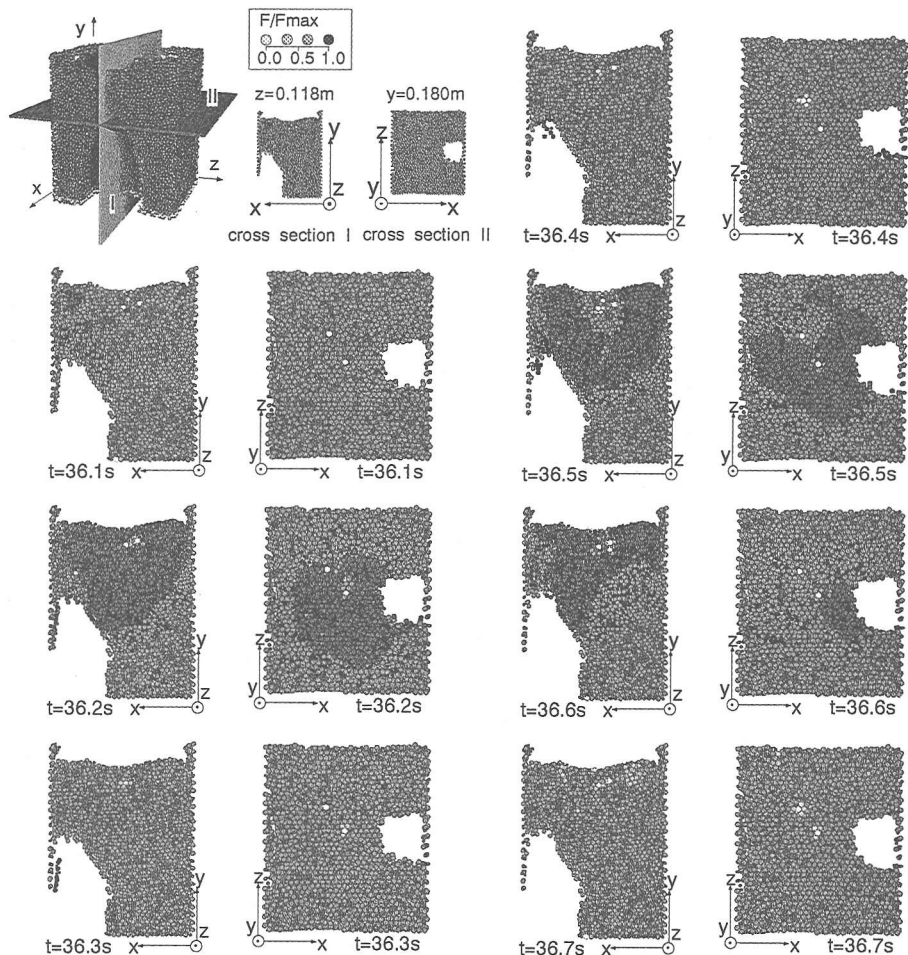


図-5 砂粒子間作用力図 (上: case-1, 下: case-2)

0.118 m) および xz 平面 ($y=0.180\text{ m}$) の状況を図-5 に示す。なお、作用力のレベルは砂粒子色の濃淡で示している。時刻 $t=36.2$, 36.5 および 36.6 s に示されているような、高レベルの砂粒子間力の作用領域が周期的に空洞周辺砂地盤にアーチ状に現われて、大規模な砂地盤崩壊に対して抵抗する様子が伺える。砂粒子間力の空間分布の推移から、砂地盤中の砂粒子間力分布が短時間に目紛しく変化する過程が示されているが、これは、砂粒子剥落等の空洞表面の変化によって僅かに不安定化した砂地盤が個々の砂粒子が移動することによって砂粒子間接触力を回復し、全体として安定な方向へと構造を調整していることに対応している。なお、実際の砂地盤では砂粒子径は、本モデルより充分に小さいからこの種の粒子間力再配分プロセスは、これほど顕著には生じないであろう。この意味で本モデルの解は、粒子間相互作用を際立たせたものとなっていることには注意を要する。また、シミュレーションの全過程に渡って砂粒子間力の分布を

アニメーションにしたところ、このような周期的な砂粒子間力の高レベル領域が、砂層表層の凹部周辺を起点として、その影響領域を徐々に拡大しながら球殻状に伝播する状態が、継続して発生することが確認されており、砂地盤内に空洞が形成されて、陥没が危惧される場所では、応力分布にも一定の時間的変動が生じるものと推察される。

砂粒子間接触力が伝播する過程を定量的に評価するため、図-6 に砂粒子間接触力の空間平均値の時系列を示す。また、空洞成長過程との対応を明瞭にするために、剥落砂粒子数の時系列も併示した。なお、平均砂粒子間力 $F_{\text{ave}}(N)$ は最大平均砂粒子間力 $F_{\text{max}}(N)$ で規格化した。時刻 $t=0.0-0.6\text{ s}$ で発生する大規模な剥落によって瞬間的に砂粒子間力が減少し、その後、僅かな変動を伴うものの、一定のレベルの砂粒子間力を約 15 秒間維持する。時刻 $t=17.0\text{ s}$ 付近で生じる約 600 個の砂粒子の剥落を契機に徐々に砂粒子間力は減少し、砂地盤が不安定

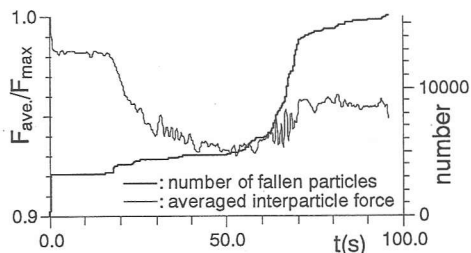


図-6 平均粒子間力の時系列

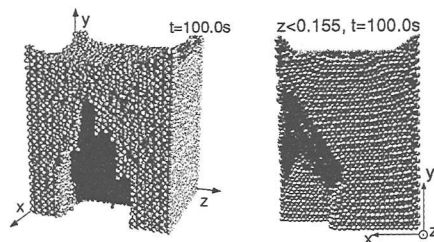


図-7 安定空洞形状および断面形状

状態にあることを示唆している。砂粒子間力の減少傾向は、時刻 $t=30.0\text{--}40.0\text{ s}$ 付近での顕著な増減動を呈しつつ、時刻 $t=50.0\text{ s}$ 付近まで継続する。この変動の増幅は、図-5の砂粒子間作用力の分布図の激しい変化過程を裏付けており、この時間帯の砂地盤構造が不安定な状態にあることが再確認できる。また、時刻 $t=60.0\text{ s}$ 以降にも空洞の砂地盤貫通に伴う砂粒子間力の激しい変動が確認できる。空洞が地表に達した後の時刻 $t=80.0\text{ s}$ 付近からは、砂地盤構造は急激には変化せず、剥落砂粒子の増加はあるものの、砂粒子間力は平均的には一定値を示すものと考えられる。

4. サクションの効果

本シミュレーションでモデル化したサクションの効果を検証するため、 $\alpha=0.010$ と設定したケースの安定空洞形状およびその断面形状のスナップショットを図-7に示す。これまで議論してきた $\alpha=0.005$ の場合と比較して見かけの粘着力が強く作用する不飽和砂地盤の条件である。この場合、砂粒子の剥落は初期に発生するのみで、空洞の成長は早期に収束し、砂地盤は安定した構造を形成して陥没には至らなかった。また、空洞の断面は、三角形状を呈し鳥居・福濱 (2002) の実験と類似した結果を得た。

5. 結 語

本研究では、砂の吸出しによる砂層内の空洞形成過程を、3次元個別要素法に基づいた粒状体モデルを用いた数値シミュレーションによって検討した。また、不飽和砂地盤に見られるサクションの効果に対しては、砂粒子

間力の評価式に引張り抵抗を導入してモデル化した。シミュレーションの結果、多数の小規模の砂粒子の剥落のイベントが、砂地盤内の砂粒子間力の状態を不安定に至らせ、大規模な剥落を誘発するといった空洞の成長過程の非定常性が明らかとなった。今後は、波浪による吸出し力の評価や地下水面の状態を考慮したサクション効果の空間分布についても検討を進めて、この種の問題において個別要素法型の数値モデルが広範囲の条件で適応可能になるように改良したい。

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. 691/II-57, pp. 159-164.
- 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 46 巻, pp. 613-618.
- 重村利幸・滝口和男・多田 毅・林建二郎・藤間功司 (2002): 防波護岸背後からの土砂吸出しに関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 871-875.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・下迫健一郎・善 功企 (1996): 防波護岸の吸い出し災害のメカニズムに関する水理模型実験, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 666-670.
- 陳 光斉・善 功企・笠間清信 (2002): DDA による海岸砂浜陥没の数値シミュレーション, 京都大学防災研究所「変動水圧と水中地盤に関するシンポジウム」, pp. 67-72.
- 鳥居謙一・福濱方哉 (2002): 波浪による砂層内における空洞の形成に関する模型実験, 京都大学防災研究所「変動水圧と水中地盤に関するシンポジウム」, pp. 55-60.
- 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, 125 p.
- 前野詩朗・Lechoslaw G. B.・藤田修司 (2002): 変動水圧場における護岸目地からの裏込め土砂の流出と防止に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 876-880.