

人工海浜砂層内空洞の形成過程に及ぼす埋設物の影響

酒井 哲郎* ・ 後藤 仁志** ・ 原田 英治***
許 伶宅**** ・ 岩本 晃幸*****

人工海浜では、護岸背後に埋め立てられた砂地盤が常時の波浪の外力によって防砂板の亀裂等の隙間を通じて吸出され、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・陥没を誘発する被災事例があるが、空洞成長メカニズムの理解は必ずしも十分ではない。本稿では、三次元個別要素法を基礎とした粒状体モデルを用いた数値シミュレーションによって、特に、地盤内埋設物が空洞成長過程に及ぼす影響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接触力の観点から検討し、埋設物を含む地盤での空洞形成機構を明らかにした。

1. 緒 言

2001 年年末に兵庫県明石市の大蔵海岸で発生した陥没事故は、人工海浜の日常的な安全性・快適性への配慮の重要性を強く示唆しており、事故再発防止および軽減対策には、陥没発生メカニズムの検討は必須事項であることは言うまでもなからう。大蔵海岸での事故調査(土木学会 海岸工学委員会, 2002)によって、砂地盤内の空洞形成が陥没の引き金になることが室内実験によって確認された後、空洞成長機構に関する研究が活発に進められ一定の成果が得られている(例えば、鳥居ら, 2002; 陳ら, 2002; 原田ら, 2003)。

ところで、大蔵海岸の陥没現場では、地盤内に水道管が埋設されている箇所が存在し、水道管等の埋設物が空洞形成に及ぼす影響を検討することも重要な課題の一つである。砂地盤に埋設された水道管が空洞の発達に及ぼす影響についての室内実験(土木学会 海岸工学委員会, 2003)が実施されているが、水道管等の埋設物が空洞形成に及ぼす影響の基本的な理解には、実験では測定が困難である地盤内部の空間的な支持力分布等の情報が必要であるため、数値シミュレーションによる検討が効果的である。さらに、空洞が、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力によって保持され、複雑な三次元構造を呈していることを鑑みると三次元モデルによる検討が有効であると考えられる。

そこで、本研究では三次元個別要素法型地盤モデルを用いた数値シミュレーションによって、水道管が埋設された砂地盤における空洞成長過程を再現し、水道管の有無が空洞成長過程に与える影響を計算力学的に明らかにする。さらに、砂地盤内に埋設された水道管の設置場所の違いがもたらす空洞成長過程への影響を検討するために、水道管の設置位置を系統的に変化させたケーススタディを実施し、実験では計測し難い砂地盤内応力分布の

特性を接触粒子間力分布を通じて検討する。

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三次元個別要素法型のモデルによって記述した(後藤ら, 2002)。モデルの概略のみを以下に示す。個々の粒子の運動は、隣接粒子との接触力に起因する並進および回転の運動方程式

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \frac{\mathbf{F}_{xi}}{M_i} - \mathbf{g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{\phi}_i = \frac{\mathbf{T}_{xi}}{I_i} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M_i = \frac{\sigma \pi d_i^3}{6}; \quad I_i = \frac{\sigma \pi d_i^5}{60} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で記述される。ここに、 $\mathbf{x}_i$, ϕ_i : グローバル座標系 $\mathbf{x}$ 上での粒子 i の位置と回転角, $\mathbf{F}_{xi}$: グローバル座標系 $\mathbf{x}$ 上での粒子間接触力, M_i : 粒子 i の質量, $\mathbf{T}_{xi}$: グローバル座標系 $\mathbf{x}$ 上での粒子間作用モーメント, I_i : 粒子 i の慣性モーメント, $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル, σ : 粒子の密度である。

粒子間接触力に関しては、二粒子間接平面の法線方向および接平面内に採ったローカル座標系において、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) を配置してモデル化する(図-1 参照)。粒子運動はグローバル座標系で追跡され、粒子間接触が生じると接触力の評価がローカル座標系で行われる。

(2) サクシオンのモデル化

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(サクシオン)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。ここでは、原田ら(2003)と同様に、サクシオ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オンの効果は、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

$$F_\xi(t) = F_\eta(t) = F_\zeta(t) = 0 \quad \text{when} \quad e_n(t) < -F_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

* 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
** 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
*** 正 会 員 工博 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科
**** 学生会員 工修 京都大学大学院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

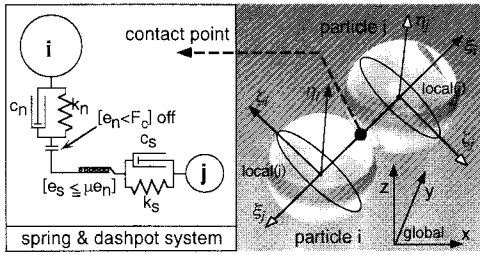


図-1 ローカル座標系

$$F_c = \alpha \cdot k_n \cdot d_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

接平面 (η 軸および z 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

$$F_\eta(t) = \mu \cdot \text{SIGN}(e_n(t) + F_c, e_{s\eta}(t)) \quad \dots\dots\dots (6)$$

when $|e_{s\eta}(t)| > \mu(e_n(t) + F_c)$

$$F_z(t) = \mu \cdot \text{SIGN}(e_n(t) + F_c, e_{sz}(t)) \quad \dots\dots\dots (7)$$

when $|e_{sz}(t)| > \mu(e_n(t) + F_c)$

を配置して表現した。ここに、 F_c : 粘着の効果を表す力、 F_η : 法線方向力、 F_z : 接線方向力、 α : 引っ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 ($\mu = 0.577$)、 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、 $\text{SIGN}(a, b)$ 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。この計算領域は、室内実験 (土木学会 海岸工学委員会, 2003) が対象とした領域を参考にして決定しており、砂地盤高さは室内実験と同一に設定した。なお、以後、本文中の「室内実験」は、この実験を指す。また、砂地盤は、砂粒子径 $d = 5 \text{ mm}$ 、比重 $\sigma = 2.65$ の均一粒子が、固定境界粒子 (側壁および水道管) の初期配列条件下において可能な限り最密に充填されるように初期配列を設定した。なお、固定境界粒子の粒径および比重は砂粒子と同一であり、粒径程度の凹凸を有する粗面である。計算対象領域での砂地盤構成粒子数は、砂地盤: 58,212 個、側壁: 8,961 個、水道管: 60 個であり、総粒子数 67,233 個である。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去除し、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 1,000 個を瞬間的に去除く操作 (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地盤中の空洞の成長過程を追跡する。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、

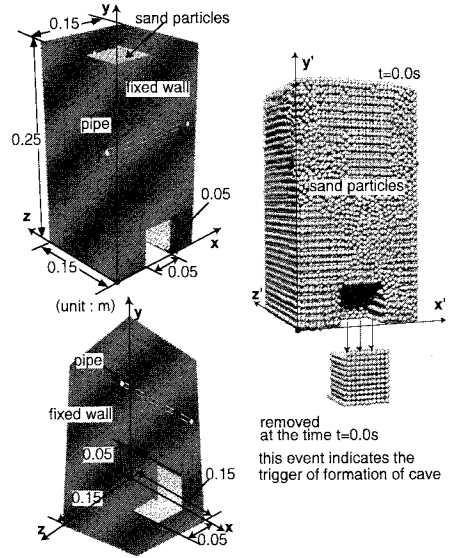


図-2 計算領域

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。

(4) モデル定数

本シミュレーションで使用したモデル定数は、シミュレーション結果が、室内実験における空洞の形状と類似した傾向を示すように、後藤ら (2001) の設定法を参考にして調整して、個別要素法で用いる計算時間ステップ $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ に対して、 $k_n = 50.24 \text{ N/m}$ 、 $k_s = 19.32 \text{ N/m}$ 、 $c_n = 0.20 \text{ Ns/m}$ 、 $c_s = 0.18 \text{ Ns/m}$ に設定した。また、サクションによる見かけの粘着力を規定する係数は、 $\alpha = 0.011$ に設定した。なお、シミュレーション結果の実験結果に対する再現性は次章で述べる。

3. シミュレーション結果

(1) 実験との比較

図-3 にシミュレーションにおける水道管の有無の違いによる空洞成長過程のスナップショットを、空洞内部構造が理解しやすいように、 $x = 0.075 \text{ m}$ における y - z 平面の断面形状によって示す。なお、水道管の設置位置は、 $y = 0.17 \text{ m}$ 、 $z = 0.015 \text{ m}$ であり室内実験の設定と同様である。スナップショットからは水道管の有無による空洞成長過程には顕著な相違は確認されず、空洞の形成過程は概ね一致する傾向を示す。

また、シミュレーションにおける空洞形状の室内実験に対する再現性を確認するため、双方の空洞の断面形状を図-4 に示す。水道管の存在の有無に依らず、シミュレーション結果が実験結果で得られた形状を良好に再現

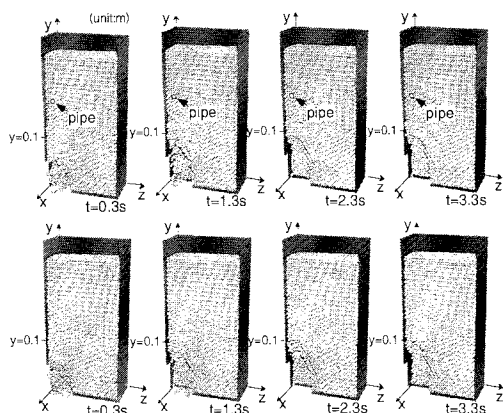
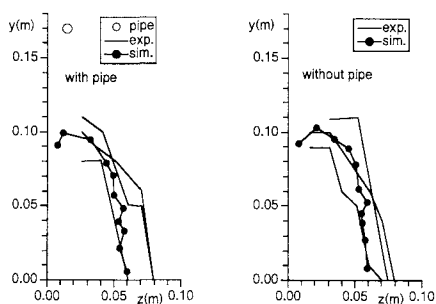


図-3 スナップショット(上:水道管有り,下:水道管無し)

図-4 断面空洞形状 (y - z 平面, $x=0.075$ m)

していることが確認できる。

次に、空洞の規模(体積)について検討するため、図-5に剥落砂粒子数の時系列を示す。図中の「Num.」は吸出し口よりも下方($y_i < 0.0$)へ落下した剥落砂粒子数の累積値を示す。安定した空洞形成時(時刻 $t=3.3$ s)の累積剥落砂粒子数は、水道管の有る場合は2820個、一方、無い場合は2798個であり、形成された空洞が同程度の規模であることが確認できる。

以上のように、シミュレーション結果が水道管の有無によって空洞の規模が変わらないこと、また、室内実験の断面形状と類似していることから、室内実験の報告書における考察「水道管の有無が空洞の発達に影響を与えない」と同様な結果をシミュレーションによって良好に再現できていると言えよう。

ところで、図-3のスナップショットでは水道管の有無による空洞形成の明確な相違は確認できなかったが、詳細に図-5の累積剥落砂粒子の時系列を見ると、双方の違いが示されている。すなわち、時刻 $t=0.0$ sで吸出し口が形成された後、時刻 $t=1.1$ sまでは水道管の有無によらず双方とも類似した剥落砂粒子数の推移を示すが、その後は水道管の有無による相違が顕在化することが分かる。水道管が無い場合は、砂粒子の剥落が短時間

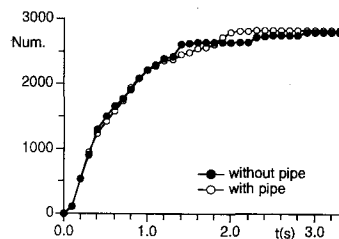


図-5 累積剥落粒子数の時系列

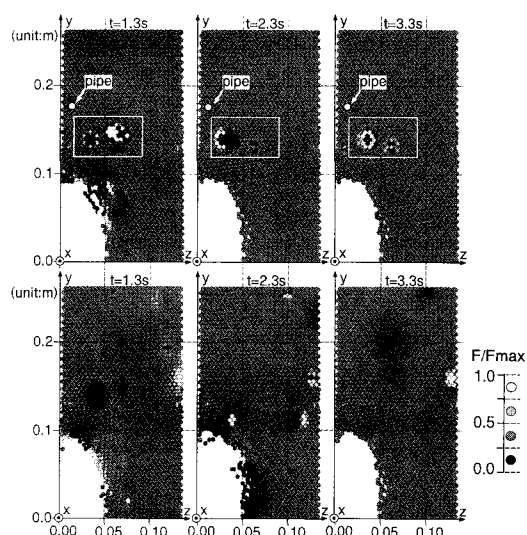


図-6 砂粒子間力分布(上:水道管有り,下:水道管無し)

の発生過程と比較的長い休止過程を数回繰り返す、時刻 $t=2.9$ s付近で安定空洞形状へ落ち着く。一方、水道管がある場合は、砂粒子の剥離率を概ね一定に保持しつつ安定空洞形状へと進行し、時刻 $t=2.1$ sに剥落砂粒子数の変化が終息する。このように、水道管の有無に依存せず安定した空洞の形状および規模は類似するものの、安定した空洞へ至る過程が異なることは興味深く、水道管が砂地盤の内部構造に影響を与えていることを示唆した結果であると考えられる。砂地盤の内部構造を理解するために図-6に砂粒子間力の分布図を示す。水道管がある場合は無い場合と比較して、特定の領域(図中の白色実線で囲んだ枠内)における粒子間の局所的な集中および変動が際立つが、他の領域の砂粒子間力の時間的変化は僅かであり、空洞表層付近の砂地盤への影響は小さいと考えられる。一方、水道管が無い場合は砂地盤全体に砂粒子間力の変動が確認できる。さらに、空洞表層近傍においても水道管が無い場合は有る場合と比較して砂粒子間力分布の時間的変動が顕著であり、図-5で示された砂粒子の断続的な剥落を裏付けているものと考えられる。

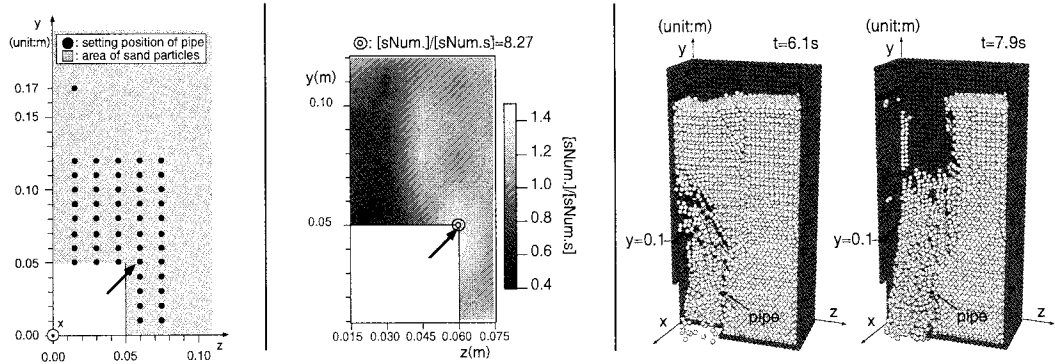


図-7 左：水道管の位置，中：剥落砂粒子数の濃淡図，右：スナップショット（崩壊過程）

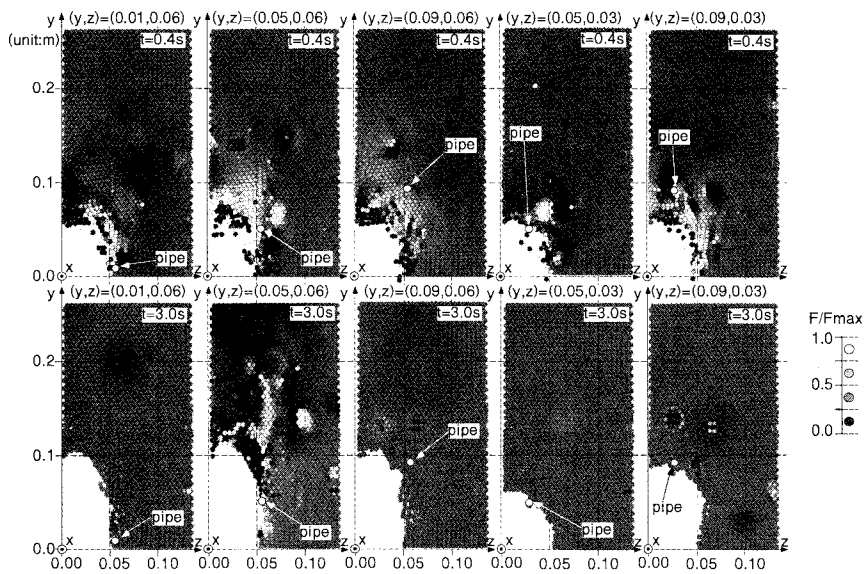


図-8 砂粒子間力分布（上段：時刻 $t=0.4$ s，下段：時刻 $t=3.0$ s）

(2) ケーススタディ

前節で水道管の存在が砂地盤の内部構造に影響を与えることが示された。そこで、砂地盤内に埋設された水道管の設置位置の違いがもたらす空洞への影響を検討するために、水道管の設置位置を系統的に変化させたケーススタディを実施した。ケーススタディで実施した全48ケースの水道管の設置位置を図-7の左図に示す。なお、図中の $y < 0.05$ m, $z < 0.05$ m の範囲は空洞形成のトリガーに当たる箇所であり、この領域の砂粒子は非表示とした。図-7の中図は、各々の水道管の位置で形成された空洞の規模を剥落総砂粒子数 (sNum.) によって評価して、濃淡図にしたものである。なお、図中の値は、水道管が $y=0.17$ m, $z=0.015$ m に設置された場合 (シミュレーションにおける水道管の設置位置が室内実験と同一) の剥落総砂粒子数 (sNum.s) を基準に規格化してある。また、規格化されたデータを線形補間し、水道管の

設置位置が網羅されていない領域のデータを作成した。 $z < 0.03$ m 付近は濃色の領域で占有されており、この領域に水道管が設置された場合には、形成される空洞が他の領域に水道管が設置された場合と比較して小規模になることが理解できる。また、トリガー領域のコーナー (図中に矢印で示した箇所) 付近は白色領域が分布しており、形成される空洞が大きくなる傾向にあることが分かる。さらに、濃淡図中には表示していないが、一連のシミュレーションの中で、図-7の左図および中図に矢印で示された箇所 ($y=0.05$ m, $z=0.06$ m) に水道管が設置された場合は、 $[sNum.]/[sNum.s]=8.27$ が示すように他と比較して極端に値が大きく特異なケースであった。このケースのシミュレーションの結果のスナップショットを図-7の右図に示すが、空洞が形成されず砂地盤が崩壊した様子が見て取れる。何故、この設置位置のケースのみ砂地盤が崩壊したのか、砂粒子間力の観点から検討

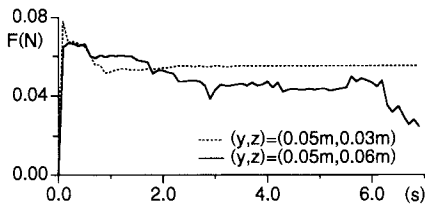


図-9 水道管に作用する力の時系列

する。ケーススタディで実施した48ケースから崩壊したケース含む5ケースを代表として抽出し、それらの砂粒子間力分布を図-8に示す。図の上段に示した時刻 $t=0.4$ s の砂粒子間力分布からは、いずれの水道管の設置位置においても、空洞表層付近を被覆するようにアーチ状の高レベル接触力の分布が確認できる。また、水道管の設置位置によって高レベル接触力の占める分布領域が異なることが理解できる。特に水道管の設置場所が $y=0.05$ m, $z=0.06$ m の砂地盤が崩壊したケースは、他のケースと比較して高レベル接触力の占める領域が広く、トリガーの上方に広がっていることから、空洞が砂地盤表層へ発達し易い不安定な条件であったと考えられる。また、高レベルの分布が主に水道管を境に左側 ($z<0.06$ m) の領域に限定されることから、この水道管が水道管より右側領域への砂粒子間力の伝達を阻害し、砂粒子間力がトリガーの上方領域に集中したと考察される。一方、特異なケースを除いて、空洞発達がほぼ終息する時刻 $t=3.0$ s の下段の図から、水道管の設置位置が、安定空洞形状に影響を与えることが分かる。また、砂地盤が崩壊する特異なケースは、砂地盤内部に高レベル領域の存在が認められ、時刻 $t=0.4$ s と比較して砂地盤の不安定な領域が砂地盤上方へ向かって拡大していることが理解できる。

水道管が砂地盤にもたらす影響を浮き彫りにするには、水道管に作用する砂粒子からの接触力の時系列が都合が良い。図-9に水道管が $y=0.05$ m, $z=0.06$ m (砂地盤が崩壊したケース) および $y=0.05$ m, $z=0.03$ m (崩壊しないケース) に設置された場合の水道管に作用する力の時系列を示す。明らかに、崩壊したケースは、崩壊せず安定した空洞を形成するケースと比べて作用力の変動が激しく、水道管近傍の砂地盤が不安定であることが分かる。また、時刻 $t=2.2$ s 以降、崩壊しないケース

の時系列が一定値を示し、安定した砂地盤状態が確認できるのとは対照的に、崩壊したケースの水道管の位置は時系列が変動を伴って推移しており、砂地盤の安定性に対する影響が極めて大きいことが確認できる。

4. 結 語

本研究では、地盤内埋設物が、砂の吸出しによる砂地盤内の空洞形成過程に与える影響を、三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計算力学的に検討することを目的とし、埋設物の設置箇所を系統的に変化させたケーススタディから、埋設物の設置位置がもたらす空洞形成過程への影響を検討した。その結果、砂地盤の不安定化を促進する埋設物の設置位置の存在が、剝落砂粒子数の空間分布および室内実験では計測し難い砂地盤内の粒子間力分布から明らかになった。砂粒子径が実際と比較して大きいこと、初期の砂地盤の粒子配列が規則的であること等、シミュレーションの条件と実際との隔たりはあるものの、本シミュレーション結果は、埋設物の設置位置が空洞形成にもたらす傾向を明らかにしており、個別要素法型の数値モデルがこの種の問題の検討に対して有効なツールとなり得ることの一端が示せた。今後は、室内実験によるシミュレーション結果の評価が必要であると考えている。

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.
- 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.
- 土木学会海岸工学委員会 (2003): 大蔵海岸 追加実験報告書, 19 p.
- 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎・鄭 知博 (2003): 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, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 891-895.