海岸堤防空洞化の加速的進行機構 に関する研究

岡部 祐美¹・佐藤 慎司²

¹ 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: okabe@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

² フェロー 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: sato@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

振動流装置を用いた実験を実施し、海岸堤防などの構造物の中詰め砂が吸い出され、堤体の空洞化が加速的に進行するメカニズムを明らかにした。流出する砂の量は、波浪により作用する圧力変動振幅と堤体内の空洞の大きさに比例することが確かめられた。空洞の圧縮性により生じる体積変化により吸い出し量が規定されるため、一度空洞が生成されると、加速度的に空洞が増大するメカニズムがあることが示された。空洞部を水などの非圧縮性物質に置き換えると吸い出し量が減少することが確認され、空洞発生初期段階における効果的な吸い出し抑制策を提案した。

Key Words : void development in seawall, oscillatory pressure action, air compression, acceleration mechanism of void expansion

1. はじめに

厳しい海象条件のもとで海岸侵食が激化するわが国において、海岸保全施設の効率的な維持管理は極めて重要な課題である。2001年12月に発生した兵庫県明石市大蔵海岸での砂浜陥没事故を初めとして、施設近傍の陥没孔の発生や海岸堤防の空洞化現象は、沿岸防災や海岸の安全な利用に深刻な問題をもたらしている。これまでに行われた研究には、空洞化の発生メカニズムや発生条件などの解明をテーマにしたものが多数存在し、空洞化においては中詰め材の特性や堤体内の圧力伝播が非常に重要であると報告されている（例えば、岩崎ら¹⁾など）。堤防の空洞化には、中詰め砂の特性や波浪作用下の流速・圧力変動などが複雑に影響し、短時間で大きな空洞が発達する事例も見られるが、現地スケールの外力変動条件をさまざまに制御し、急激に進行する空洞化の発達機構を観察したものは少ない。

本研究においては、振動流装置を用いた実験により、振動流下における砂の吸い出し挙動と圧力変動との関係や、空洞の大きさによる吸い出し量の違いを明らかにし、海岸堤防空洞化の発生と加速的進行機構を解明することを目的とした。

図-1 振動流装置の全体図

図-2 振動流装置の観測区間拡大図

2. 圧力振幅と吸い出し量に関する実験

図-1 に示す振動流装置で砂の吸い出し実験を実施した。同装置は閉鎖型管路であり、電圧信号を入力することによりピストンを駆動し、任意波形の振動流を発生させることができる。管路の一部は図-2 に示すように強化アクリル壁矩形断面の観測区間となっており、同区間に細砂を詰めた細孔つき容器を設置し、容器からの砂の流出機構を観察した。観測区間左端を原点として、右向き正の水平座標 x を設定した。

(1) 装置内の圧力変動に関する検討

装置内の圧力は、振動流の発生により変動する。水粒子の水平変位を ξ とすると、振幅 a の正弦振動流は以下の式で表される。

$$\xi = a \cos \omega t \quad (1)$$

ここで、 $\omega (=2\pi/T, T$ は周期)は角周波数である。水平方向の水粒子速度 u と加速度 α は、

$$u = -a\omega \sin \omega t \quad (2)$$

$$\alpha = -a\omega^2 \cos \omega t \quad (3)$$

で与えられ、圧力 p は、水平方向の運動方程式を積分することにより、

$$p = \int_{x_0}^x \rho a \omega^2 \cos \omega t dx = \rho a \omega^2 (x - x_0) \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 x_0 は圧力変動がゼロとなる位置を表している。圧力変動の振幅 $\hat{p}$ は、

$$\hat{p} = \rho a \omega^2 (x - x_0) \quad (5)$$

で与えられ、観測区間では水平座標に対して線形に変化することになり、重複波の節周辺の圧力分布と類似している。

振動流装置の管路は、複数の形状の異なる鉄管で構成されているため、 x_0 の位置が不明確である。そこで、観測区間の計3箇所にもノメータを設置し、周期3～5秒、流速振幅4～25 cm/sの条件に対してノメータ内の水面変動振幅を測定することで振動流装置内の圧力変動分布を調べた。その結果、図-3に示すように、圧力変動ゼロの位置は $x_0=600$ cm付近であり、観測区間内では左端($x=0$ cm)で最も圧力変動が大きく、右端($x=600$ cm)で最も圧力変動が小さいことが判明した。

(2) 側壁に薄型容器を設置した実験

まず、構造物側面から砂が吸い出される状況を想定して、観測区間側壁に砂を詰めた薄型容器を貼り付け、砂の吸い出し状況を観察した。容器には、CD ケース(縦142 mm×横124 mm×厚さ10 mm)を用い、側面ほぼ中央に直径約5 mmの細孔を空けて吸い出し穴とした。中詰砂には、中央粒径0.27 mmの珪砂を用いた。振動流の周期は3秒、流速振幅は17 cm/sの正弦波とし、作用時間は15分間を基本とした。

初期状態として乾燥した砂を詰めた実験では、振動流の作用により、容器内に水が徐々に浸入するにつれ、飽和状態となった砂の部分が出てくるのが観察された。水の浸入過程への依存性を排除するため、初期状態において中詰砂を飽和状態に近づけて実験を実施したところ、振動流装置内に水を入れ、細孔が浸水した時点で砂が流出し始めることが観察された。これは、中詰め砂が飽和状態に近くなると砂粒子間のサクションが減少し、自重

図-3 装置観測区間の圧力変動分布

のみにより自然流出するためと考えられる。このように、構造物側面から中詰砂の流出が想定される場合には、流出孔の位置と堤体内への水の浸入が重要であり、流出孔より上部の中詰砂は、砂の湿潤状態によっては比較的容易に流出することが確認された。

(3) 底面に箱型容器を設置した実験

波浪の作用で砂が流出する状況を再現するため、厚さ3mmの亚克力板で作成した箱型容器(縦60 mm×横150 mm×高さ80 mm)を底面に設置した実験を実施した。箱型容器の上面には吸い出し口として幅7 mmのスリットを設けた。容器は、長さ6 mの観測区間に5個設置し(吸い出し口の水平座標はそれぞれ $x=150, 240, 330, 420, 480$ cmとした)、端部は流れの乱れを防ぐため底面を図-4の模式図のように容器高さ分だけ嵩上げた。中詰砂は水中で十分空気を追い出したうえで、一晩置いて飽和状態に近づけた。中詰砂には中央粒径0.27 mmの珪砂を用い、実験条件はこれまで同様、振動流の周期3秒、流速振幅は17 cm/sの正弦波、作用時間は15分間とした。

箱型容器に砂を充填した時点では、吸い出し口が上部にあるため自然流出は見られなかったが、振動流を作用させると、水の流入と水+砂の吸い出しが交互に発生していることが観察できた。

さらに、容器の設置位置によって吸い出しの程度に差が見られたため、吸い出された中詰め砂の質量を測定した。実験後の容器に残っている砂を、洗浄ビンを用いて水で洗い流して金属製容器に移し、定温乾燥器で十分に乾燥させる。乾燥後の質量を実験前の容器に詰めた砂の質量と比較することで、吸い出された砂の質量が測定できる。吸い出し口の位置座標を横軸に、容器に詰めた砂

図-4 圧力変動の大きさと吸い出し割合の関係

に対する吸い出された砂の質量の割合を縦軸にとると、図-4 のグラフのようになった。装置観測区間の圧力変動分布測定の実験結果と併せ見ると、圧力変動が大きいほど吸い出し量が多いとすることができる。

コンクリート三面張りの実際の海岸堤防に細孔が発生し、堤体内に空洞が生じる現象を考える。細孔を介して波浪の圧力変動が作用すると、孔の位置や砂の湿潤状態に応じて中詰め砂が吸い出され始め、吸い出された砂の体積分だけコンクリート板のわずかな隙間から空気が堤防内に入り込み、空洞が形成されることになる。コンクリート板の密閉性は比較的高いため、空洞の空気圧は、潮汐など長い周期の水圧変動に対しては、大気圧が維持されるものの、周期の短い通常波浪の作用では、圧力解放の時間スケールより波の周期が短いため、波浪の水圧変動にしたがい空気圧も変動を繰り返す。これにより空洞の体積は、わずかな変動を繰り返すことになり、これが細孔近傍の水や砂の流出入に影響する。この場合、砂の流出量は、容器内の空洞の大きさに依存することになるため、空洞の大きさを変えた実験を実施することにした。

3. 空洞の大きさと吸い出し量に関する実験

(1) 空洞の有無による吸い出し量の違い

図-5 に示した模式図のように、前節で使用した箱型容器の中央部に仕切りを設けて容器内部を2つの部分に分断し、左右それぞれの上面に幅 7mm のスリットを設けることで、容易に吸い出し挙動を比較できるようにして実験を行った。箱型容器の左側には砂のみを詰め、右側には空気 100 cm³ を入れたジップ付き密閉袋を容器下

左：砂のみ (空洞無し) 仕切り 右：空気入り (空洞有り)
空気の100cm³

図-5 空洞有無による圧力変動と吸い出し挙動の関係

図-6 空洞有無による吸い出し割合の比較

部に固定し、上から一晩水に浸して飽和状態に近づけた砂を詰めた。同じ容器を3つ用意し、中央の仕切りの座標が $x=150, 240, 480\text{cm}$ となるように観測区間に設置した。容器の左側では空洞が存在しない場合を、右側で空洞が存在する場合を模しているため、左右の流出量を比較をすることで空洞の有無による吸い出し挙動の違いが比較できる。この実験でも周期3秒、流速振幅17 cm/sの正弦波を15分間作用させた。また、容器の左右での吸い出し口座標の違いによる影響を排除するため、空洞有り無しの条件を左右入れ替えて、計2回実験を行った。空洞有り無しそれぞれの場合の吸い出しの様子が図-5である。写真左が砂のみのケース、右が空気入りのケースで、1周期間の吸い出しの様子を図-5下部のグラフのように①-⑨に分割して抜き出した。どちらのケースでも、水の流入と水+砂の流出が繰り返されているが、振動流の圧力が高いとき(図-5における写真①付近)で水の流入が増加し、圧力が低いとき(図-5における写真⑤付近)では水と砂の吸い出しが増加した。また流出量は、図-5における写真⑤付近を左右で比較すればわかるように、砂のみのケースに比べて空気入りのケースの方が大きくなった。この流入・流出現象は、空洞の体積が最大となる際に、細孔付近から中詰砂を押し出すことで起こると考えられる。また、2回の実験の平均吸い出し量割合を表したものが図-6である。実験の観察結果から予想された通り、砂のみのケースと比べて空気入りのケースでは吸い出し量が多いことが明らかになった。

以上の実験結果をもとに、海岸堤防内の空洞形成を模式的に表すと図-7のようになる。初期の空洞体積を V_0 、堤防内圧力を P_0 とおき、波の作用により堤防内圧力が ΔP だけ増減したとする。この変化を断熱変化と仮定し、

$$PV^\gamma = \text{const.} \quad (6)$$

で記述されるポアソンの法則を圧力の増加減少時にそれぞれ適用すると、

図-7 吸い出しと空洞化進展の模式図

$$P_0 V_0^\gamma = (P_0 + \Delta P) V_-^\gamma = (P_0 - \Delta P) V_+^\gamma \quad (7)$$

と表せる。ここで、 V_+ および V_- はそれぞれ圧力増加時と減少時の空洞の体積である。したがって、圧力変動に伴う空洞の体積変化 ΔV は、

$$\Delta V = V_+ - V_- \approx 2 \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta P}{P_0} P_0^\frac{1}{\gamma} V_0 \quad (8)$$

と表すことができる。先述したように、吸い出しは水の流入と水+砂の流出が交互に繰り返されて進行していくが、水+砂の流出体積は ΔV に比例し、砂の吸い出し量は水+砂の流出体積に比例すると考えられるため、砂の吸い出し量は ΔP だけでなく V_0 にも比例すると予想できる。

以上の空洞進展メカニズムを検証するため、容器内の空気量を変えた実験を実施し、砂の吸い出し量が空洞の体積に比例することを確かめることにした。

(2) 空洞体積と吸い出し量の関係

空洞の大きさと吸い出し速度との関係を検証するため、箱型容器とジップ付き密閉袋を使用し、容器内の空気量を変えることで吸い出し量がどのように変化するかを比較する。空気量は $0\text{ cm}^3, 100\text{ cm}^3, 200\text{ cm}^3, 300\text{ cm}^3$ の4パターンである。これまでの実験同様、周期3秒、流速振幅17 cm/sの正弦波を作用させるが、初期条件を制御した実験開始状態での流出速度を精度良く計測するため、振動流の作用時間は90秒間とした。

実験結果を表したものが図-8である。これまでの実験から、砂の流出量 ΔV_s は、振動流の圧力振幅 ΔP に比例することがわかっているため、砂の流出量を水頭で表した圧力振幅と実験時間で除して、 $\Delta V_s / (\Delta P / \rho g) \Delta t$ を縦軸に取り、横軸には単位幅あたりの空洞の大きさ V_0/B を取った。砂が流出した分だけ空洞が拡大するので、縦軸は、単位幅あたりの空洞面積の増大速度を示している。

図-8 空洞の大きさ（横軸）と空洞の増大速度（縦軸）との関係

図-9 周期の違いによる空洞の大きさ（横軸）と空洞の増大速度（縦軸）との関係

表-1 空洞体積による流出体積中の砂体積の割合

空洞の体積 (cm³) V_0	100	200	300
全流出体積 (cm³) ΔV	6.21	12.4	18.6
一回あたりの砂吸い出し体積 (cm³) $V_s/30$	0.15	0.26	0.37
全流出体積中の砂の割合 (%) $V_s/30/\Delta V \times 100$	2.44	2.12	1.98

ただし、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 Δt は振動流作用時間、 V_0 は容器内の空気の体積、 B は観測区間の幅である。図-8から分かるように、空気量 0 cm^3 における吸い出し量分を差し引くと、空洞の増大速度は空洞の大きさに比例している。この関係を式で表すと式(9)となり、その解は式(10)のように指数関数で表すことができる (α , c は定数)。

$$\frac{dV_0}{dt} = \alpha V_0 \quad (9)$$

$$V_0 = ce^{\alpha t} \quad (10)$$

式(10)は、空洞の体積が指数関数的に増大することを示しているため、一度空洞が生成されてしまうと空洞は加速的に増大する。よって空洞化抑制のためには、吸い出し流量が小さいできるだけ早い段階で空洞化の進行を抑制する対策が必要である。また、この実験結果から、水+砂の流出体積中の砂の体積割合を概算することができる。式(8)の関係を、常温常圧下での空気の体積弾性率 K で具体的に書き直すと、

$$K = -V_0 \frac{\Delta P}{\Delta V} = 1.4 \times 10^5 \text{ (Pa)} \quad (11)$$

と表せることから⁹⁾、空洞体積 V_0 の値によって ΔV が決まる。さらに、振動流の周期は 3 秒であるから、実験時間 90 秒間に 30 回の水の流入と水+砂の流出が繰り返されている。砂の吸い出し流量が経過時間に対して一定であると仮定すると、一回あたりの砂の吸い出し体積は

$\Delta V_s/30$ で求められる。 V_0 の値による流出体積中の砂の体積割合は表-1 のようである。

表-1から明らかなように、本実験条件では、空気体積に関係なく水+砂の全流出体積中の2%前後が砂の体積である。空洞体積が大きいと砂の吸い出し流量が大きいのは、流出体積中の砂の濃度はほぼ変わらないが、流出体積そのものが増加するためと結論付けられる。

(3) 振動流の周期と吸い出し量の関係

振動流の周期の影響を検討するため、周期を 1.5 秒にして、空気量 0 cm^3 、 100 cm^3 において前節と同様の実験を行った。式(5)より圧力振幅は周期の二乗に反比例するため、振動流の振幅を 1/4 倍にすることで、圧力振幅をこれまでの実験と同一条件に揃えた。周期が 1/2 倍になると振動流作用時間に対する吸い出し回数は 2 倍になるため、砂の吸い出し量は 2 倍となり、空洞の増大速度も 2 倍になると予想できる。図-8 に本実験の結果を加えたものが図-9 である。図-9 より、周期 1.5 秒での空洞の増大速度は周期 3 秒の時とほとんど変わらないという結果が得られた。この結果は予想と反しているが、その要因としては、砂層内の圧力伝播の減衰は周期に依存するため、短周期条件では振動流の圧力変動が容器内の空洞部に伝播しにくくなるからであると考えられる。また、流出孔付近の砂粒子の有効応力の減少度合いは、周期が短いほど大きくなるため、これが吸い出し量に影響している可能性もある。

4. 空洞の拡大抑制策に関する実験

これまでの実験により、空洞の加速的進行を抑制するには、できるだけ初期の段階で効果的な対策を取ることが肝要と示唆される。空洞内の空気が圧縮されてそれがポンプの役割となって中詰砂を押し出すメカニズムが、

図-10 空洞充填による吸い出し砂の割合

加速度的な空洞増大機構の本質であるため、対策としては空洞を非圧縮材料で充填することが効果的と考えられる。

箱型容器とジップ付き密閉袋を使用し、袋内の空気を水に置き換えて、3章1節と同様の実験を行った。この実験結果を図-6に重ねて示すと図-10のようになる。この図から、容器内の空気袋を水袋で置き換えたものは、置き換え前より吸い出し量が減少しており、砂のみで充填した場合の吸い出し量に近くなっていることが読み取れる。すなわち、空洞を非圧縮性物質で充填したものは、空洞が無いものと似た挙動をするということが明らかになった。したがって、空洞化の進行を抑制するには、空洞を水などの非圧縮性物質で充填し、波浪の変動圧力が作用しても体積変化を生じさせないようにすることが有効と考えられる。

5. 結論

本研究では、振動流装置を用いた実験から振動流下における砂の吸い出しの挙動を観察するとともに、吸い出し量と圧力の関係や空洞の大きさによる吸い出し量の違いを明らかにし、海岸堤防空洞化の進行機構を検討した。

その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 側面に設置した薄型容器、底面に設置した箱型容器を用いた実験から、砂の基本的な吸い出し特性が、流出孔の位置、中詰砂の湿潤状態、作用水压変動などに依存することが確認された。
- (2) 中詰砂の吸い出し速度は、圧力変動の振幅と空洞の体積に比例する。すなわち、空洞化現象は高波浪時に加速的に進行していくことが示された。
- (3) 空洞の加速的増大を抑制するには、空洞形成の初期段階において、水などの非圧縮性物質で空洞を充填することが効果的である。

本研究では、海岸堤防の空洞が加速度的に進行する基本的なメカニズムが、空洞の圧縮性にあることを解明した。空洞内の空気圧変動を実測するなどして、基本的なメカニズムの周期依存性を解明するとともに、施工を考慮した現実的な対策を検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 岩崎福久, 田中茂信, 佐藤慎司, 名合宏之, 前野詩朗, 小谷祐司: 海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1026-1030, 1995.
- 2) 高橋重雄, 鈴木高二朗, 徳淵克正, 下迫健一郎, 善功企: 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, 1996.
- 3) 土木学会海岸工学委員会: 大蔵海岸 陥没事故調査報告書, pp.5-35, 2002.
- 4) 前野詩朗, Lechoslaw G. Bierawski, 藤田修司: 変動水压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, 2002.
- 5) 山本泰司, 長谷一矢, 先川光弘: 防波堤マウンド下面の砂地盤の吸い出しに関する振動流実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, pp.448-451, 2004.
- 6) 自然科学研究機構国立天文台: 理科年表, 物理/化学部, p.29, 2006.

(2015.3.18 受付)

ACCELERATION MECHANISM OF THE VOID DEVELOPMENT IN SEAWALLS

Yumi OKABE and Shinji SATO

Laboratory experiments were conducted in an oscillatory flow tunnel focusing on the mechanism of the void development in seawalls. Rates of sand leaking from a sand-packed container through a small opening gap were measured under oscillatory pressure and velocities. The sand leaking rate was found to be proportional to the pressure amplitude and to the volume of the void in the container, which appeared to explain the acceleration mechanism of the void development frequently observed under high waves. Effective countermeasure to decelerate the void development was found to fill the void with incompressible materials in early stage of the void development.