

X線 CT 画像を用いた底質内部密度の時空間変動

熊本大学 正会員 ○山田文彦, 外村隆臣 学生会員 舟越善隆、立山竜太

1. はじめに

混合砂中の粗粒砂の移動量は均一砂と比較して小さくなるが、これは粗粒砂の空隙に細粒砂が入り込むことで空隙率が減少し、密度や強度が増加するためである。そのため、養浜地形予測モデルでは、波動・流動場のみならず、交換層厚に直接関係する底質の鉛直分級過程や地盤強度・空隙の時空間変動特性を考慮する必要がある。しかし、ビデオ画像等の可視化実験のみでは地形変化に伴うこれらの時空間変動を定量的に評価することが難しいため、交換層厚については物理的根拠の取扱いが不明確になされる場合が多い。そこで、本研究では混合砂を用いた移動床実験において、バー・トラフ等の特徴的な場所でコアサンプリングを時系列的に行い、X線 CT スキャナーを用いて底質内部の密度・空隙構造の時空間変動について検討した。

2. 岸沖海浜断面変形の室内実験

1) 室内実験による地形変化 長さ 18m、高さ 0.8m、幅 0.6m の 2 次元造波水槽を用いて初期勾配 1/15、水深 0.4m で海浜変形実験を実施した。入射波は不規則波とし、地形変化が定常とみなせるまで波を作用させた。その作用時間は Case-A、B が 17 時間、Case-C、D は 19 時間である。実験条件の概要を表-1 に示す。

波高、流速、濁度の測定は、容量式波高計 7 台、電磁流速計 1 台、透過光式濁度計 1 台を用い、波高・濁度は 100Hz、流速は 200Hz で測定した。地形変化の時空間変化は数時間毎にレーザー距離計により 2cm 間隔で計測した。粒径分布の時空間変化は非接触手法である Rubin の画像計測手法 1)を用いて算出した。そのため、デジタルカメラを用いて底質表面を地形変化と同じ時間間隔で岸沖方向 (10cm 間隔) に撮影した。また、地形変化が定常状態に達した後、特徴的な地形変化が生じた場所 (図-1 中の赤丸) でコアサンプリング (内径 4cm、厚さ 3mm、鉛直方向 30cm のアクリル製サンプラー) を行い、X線 CT スキャナーを用いて底質内部の空隙や密度構造の相違を非破壊状態で表面から 5mm 間隔で撮影した。

図-1 は Case-B (侵食型) で定常に達するまでの海浜断面の時間変化 (上段) とその標準偏差 (σ) の岸沖分布 (下段) を示す。図中の赤丸 (○) はバー頂上を示し、波作用 2 時間後に $x=3.2\text{m}$ 付近に位置したバーは時間とともに沖側へ移動し、それに伴ってトラフも沖側に存在範囲を広げている。定常に達するまでの地形変化の標準偏差は、バーム、トラフ、バー付近で大きく、その大きさは 6cm 程度である。

図-2 に中央粒径(D50)の時空間変動特性 (実線: 中央粒径の平均値, 点線: 標準偏差 ($\pm$)) と定常状態の海浜断面とを重ねて示す。上段の侵食型 (Case-B) は波作用から 2, 4, 6, 9, 12, 17 時間後、下段の堆積型 (Case-D) は 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19 時間後の撮影画像から算定した中央粒径の平均値と標準偏差の岸沖分布である。中央粒径の岸沖分布を比較すると、侵食型ではバームやバー上で大きく、トラフで小さくなり、地形の起伏に応じた分布傾向が見られる。一方、堆積型ではバームから汀線にかけて一旦小さくなるが、トラフ終端付近や $x=3\text{m}$ より沖側で大きくなり、侵食型とは異なった傾向を示す。次に、中央粒径の標準偏差を岸沖方向に比較すると、侵食型ではバームから汀線にかけて一旦小さくなるが、その後 0.2mm 程度の変動幅で推移し、この傾向はトラフ終端まで見られる。トラフを過ぎるとバー上で最小の変動幅となりそれ以降も岸付近よりも小さい 0.1mm 程度の変動幅で推移する。一方、堆積型では、遡上端からバームにかけて 0.2mm 程度の変動幅で推移し、汀線付近で一旦小さくなる。その後は沖側まで 0.2mm 程度の変動幅で推移している。

このように Rubin の画像計測手法を用いて侵食・堆積型における粒径分布の時空間変化を非接触で比較することで中央粒径の平均値と標準偏差の岸沖分布の相違が明らかとなった。

2) X線 CT スキャナーによる底質内部の密度構造解析 X線 CT スキャナーでは、撮影した水平断面内の CT 値がボクセル (水平方向 0.073mm, 鉛直方向 1mm) 毎に出力される。この CT 値は撮影した物質の密度に比例するので、用いた底質毎に密度変換式を求めた。

表-1 実験条件

Case	入射波高 (m)	周期 (s)	中央粒径 (mm)	C パラメータ	地形変化の 分類
A	0.133	1.23	0.50	7.8	中間型
B	0.140	1.43	0.50	7.5	侵食型
C	0.038	1.15	0.50	2.4	堆積型
D	0.038	1.15	0.38	2.8	堆積型

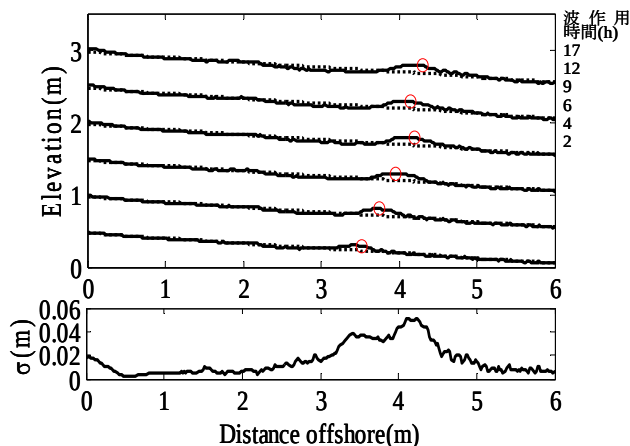


図-1 海浜断面の地形変動特性 Case-B (侵食型)

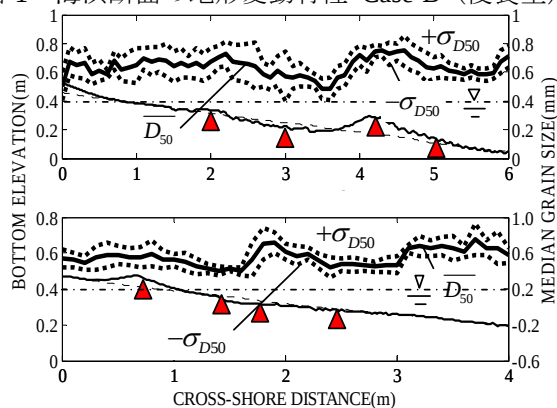


図-2 中央粒径の岸沖変動特性

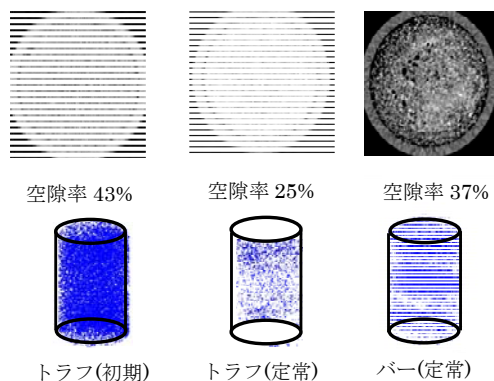


図-3 X線CTによる撮影結果

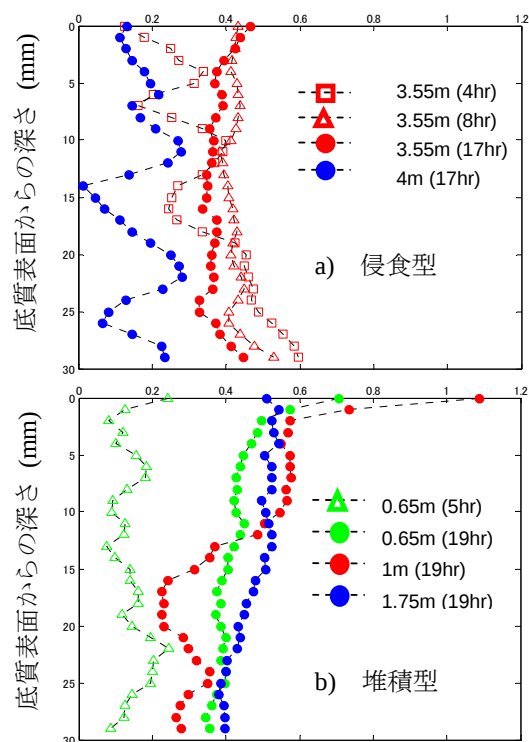
図-4 底質かさ密度の増分量の時空間変動
(横軸：かさ密度(g/cm³))

図-3はCase-Bにおいてトラフとバーで採取したコアのX線CTの撮影結果である。上段は表層10mmでのCT値の平面分布を256階調で示したもので、白色ほど高密度である。a), b)図よりトラフでは定常状態に至るまでに密度増加が確認できるが、c)図のバーでは定常状態でも低密度域(黒色)が混在する。また、下段は空隙を含む低密度域を抽出し、コア全体として3次元再構成した結果である。トラフでは定常状態に至るまでに空隙部分(青色)が均等に減少し、空隙率は43%から25%に減少している。これは、粗粒砂の空隙への細粒砂の入り込みや圧密による空隙の減少を表す。次に、バーでは定常状態でもかさ密度に粗密構造が存在し、トラフほど空隙率は減少しない。

3. おわりに

実験結果からRubinの画像計測手法やX線CTスキャナーは、現地や室内実験の底質表面の粒度分布や内部の密度構造の時空間変動を非破壊で短時間に把握できる有効な手法であることが示された。また、現状のモデルでは時間に依存しないと仮定していた空隙率が時空間で変動すること、また、かさ密度の増加が局地的な地形変化に依存し、地盤強度に影響を与えることなどがわかり、今後のモデルの一方向性が示された。

謝辞 本研究の一部は平成20・21年度土木学会中部支部リサーチグループ活動の一環として行われた。

参考文献 1) Rubin, D. M., J. of Sedimentary Research, 74 (1), pp.160-165, 2004.

2) 山田ら, 海岸工学論文集, 55, pp. 791-795, 2008.