

第Ⅲ部門

水路を用いた粘着性土の表面侵食挙動の画像解析による観察

京都大学大学院 学生会員 ○山内敏貴
 京都大学大学院 正会員 肥後陽介
 港湾空港技術研究所 正会員 高野大樹
 京都大学大学院 音田慎一郎

1. はじめに

洪水時の越流による破堤解析には表面流による土の侵食の解析が重要である¹⁾。表面侵食は土の破壊現象の一種と考えられるが、現在提案されている侵食条件式は流砂量等を元に求められた経験式であるため、表面土の破壊メカニズムは考慮していない。さらに、粘着性土地盤の表面の破壊メカニズムについて知見が十分ではないのが現状である。そこで本研究では、水路模型実験の様子をハイスピードカメラで撮影し、画像解析を行うことで、粘着性土地盤の破壊挙動を調べた。

2. 水路模型実験

本研究では、直線水路に粘着性土の模型地盤を作成し水流を発生させ、模型地盤が破壊されていく様子を観察・撮影した。また、比較のため非粘着性土でも同様の実験を行った。珪砂7号と藤森粘土を重量比7:3で混合し、含水比を15%としたものを粘着性土、珪砂7号と非塑性のDLクレーを重量比7:3で混合し、含水比を10%としたものを非粘着性土として使用した。土粒子密度は珪砂7号が $2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、藤森粘土が $2.70 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、DLクレーが $2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ であり、藤森粘土の塑性指数は24.2であった。作成した模型地盤には撮影箇所付近に、撮影を行いやすくするために初期不整を与え、粘着性土地盤のみ画像解析の精度を上げるために、墨汁で染色した珪砂7号を用いて作成した粘着性土を一部使用し濃淡を与えた。図1は模型地盤概略図を、図2は実験概略図を示しており、赤い矢印は撮影箇所を表している。

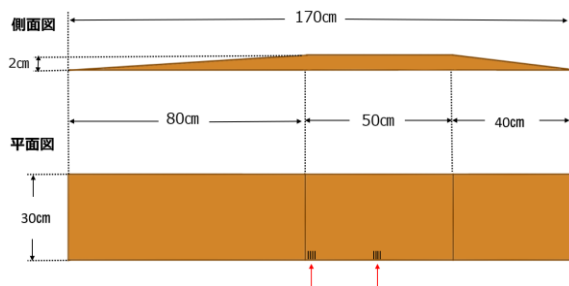


図1 模型地盤概略図

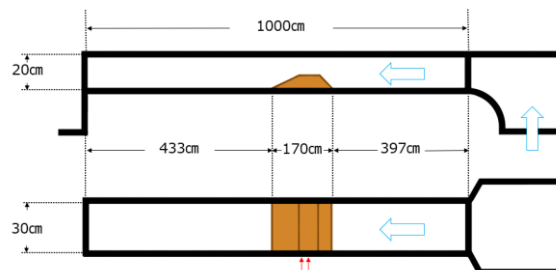


図2 水路模型概略図

3. 実験結果

図3・図4は撮影開始時を $t=0 \text{ (s)}$ とし、各時間における模型地盤の侵食過程をスケッチしたものである。図より、非粘着性土は下流側法面から上流側に向かって緩やかに侵食されている様子がみられるが、粘着性土は一定の角度に局所的に侵食されていく様子がみられる。粘着性土がこのような侵食形態をとるのは、粘着強さにより水流のせん断力にある程度の抵抗を示すため、局所的に破壊が発生しているからだと考えられる。

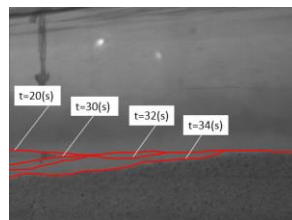


図3 非粘着性土の侵食過程

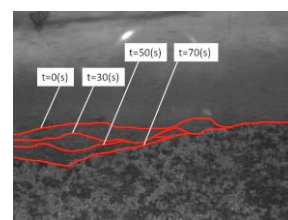


図4 粘着性土の侵食過程

4. 画像解析

本研究ではデジタル画像相関法²⁾(Digital Image Correlation、以下DIC)により解析を行った。DICとは変形前後2つの画像に対して相関係数を計算することによって、変形前の任意の点が変形後にどこに移動したかを分析する画像解析手法である。

解析は粘着性土地盤に対してのみ行った。図5と、これから1/500秒後の画像の二枚の画像で全範囲に対して解析を行った。図6は解析によって得られた最大せん断ひずみの分布図を示している。画像上側の水流部分は変化が非常に速く相関が上手く取れないため、本研究では

模型地盤部分のみに注目する。表面侵食挙動を見るため、侵食が見られた図6の青い部分に着目する。図7は図6の青い四角の部分拡大し、水流と模型地盤の境界線をスケッチしたものである。図7の模型地盤部分にはせん断帯のようなものがみられるため、この領域に対して水流部分を削除し地盤部分の最大せん断ひずみのみを表したコンター図を図8に示す。画像8より、最大せん断ひずみの局所化領域が見られるため、模型地盤表面でせん断破壊していることがわかる。よって、粘着性土地盤は表面流によりせん断破壊されていることがわかる。

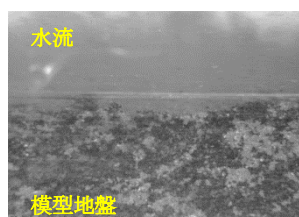


図5 変形前画像

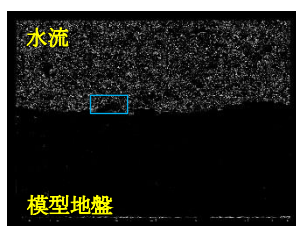


図6 最大せん断ひずみ分布

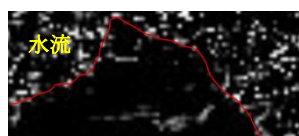


図7 拡大図

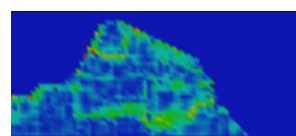


図8 地盤部分のコンター図

5. せん断破壊として考える表面侵食現象

模型地盤表面の応力状態を考えると、水流による摩擦応力が働かないときはせん断応力が0と考えられるため主応力状態、摩擦応力が働くときは外力がせん断方向の摩擦応力のみであるためせん断応力最大と仮定できる。内部摩擦角を ϕ 、破壊面の角度を θ としモールの応力円を考えると、図9のようになり、この図より幾何学的に ϕ と θ の関係を求めると、 $\phi=2\theta$ という関係が求められる。実際に画像から破壊面の角度を計測してみると、図10に示すように $\theta=11.0^\circ$ と求まるため $\phi=22.0^\circ$ となるが、この値は通常の粘土混じり砂よりも小さい。この要因として、模型地盤表面が過圧密状態であったため、内部摩擦角が小さくなっていたと考え、表面土はモール・クーロンの破壊基準に従って破壊されており、地盤表面付近でも摩擦則が成り立つと考えられる。

次に既往の研究との比較を行う。非粘着性土の粒子輸送の経験式は掃流砂量をもとに経験的に求められた流砂量式³⁾であり、既存の粘着性土の侵食速度式は侵食深

さの時間変化をもとに求められた経験式⁴⁾である。また粘着性土は経験的に、一定の流速を越えると表面で小土塊の剥離が発生する侵食形態を取り、侵食の規模が増すことが知られている。この小土塊の剥離こそ、本研究で求められた表面土のせん断破壊であると考えられる。侵食条件式は等流条件下では全面的に侵食が進むが、本研究で見られたような局所的な破壊を表現するには表面土のせん断破壊を評価することが重要であり、これは粘着性土による堤体の変形プロセスを評価する上で重要であることがわかる。

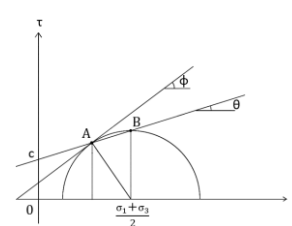


図9 模型地盤表面の応力円

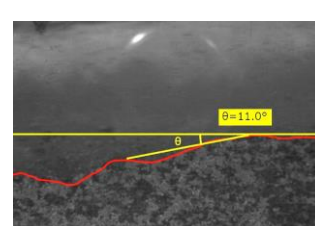


図10 破壊面の角度

6. 結論

非粘着性土とは異なり、粘着性土地盤では速い流速の条件下では、水流による摩擦応力によってせん断破壊が発生しており、表面侵食は摩擦則に従って進行すると考えられる。また、粘着性土におけるせん断破壊による局所的な破壊の進行は、既往の侵食モデルでは考慮できず、土の構成式を用いた解析で表現できる可能性がある。粘着性土地盤は一定流速を越えるとせん断破壊により侵食速度が速くなるため、粘着性土による堤体の越流時における変形プロセスを評価する上で、表面流によるせん断破壊を評価することが重要である。

参考文献

- 1) 音田慎一郎, 細田 尚, Jacimovic, N., 木村一郎: 正面越流による堤防侵食過程の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1207-I_1212, 2013.
- 2) Takano, D., Lenoir, N., Otani, J., Hall, S. A.: Localised deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation, Soils and Foundations, Vol.55, No.4, pp.906-915, 2015.
- 3) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告書, 第206号, pp59-69, 1972.
- 4) 関根正人, 熊谷利彦, 尾藤文人: 粘着性土の侵食機構に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp659-664, 1999.