

表層流れに起因して発生しうる過剰間隙水圧に着目した地盤洗掘の理論的考察

洗掘 掃流力 過剰間隙水圧

名古屋工業大学 学 ○伊藤 嘉 学 今瀬 達也
 国 前田 健一 学 久泉 友二
 北海道大学 非 泉 典洋

1. はじめに

地盤表層流れに起因した掃流力に加え、地盤内の応力変化が洗掘を助長させることがある。著者らの研究¹⁾において、開水路流れや越流流れに起因して地盤内部に過剰間隙水圧が生じ、洗掘現象を助長すること明らかになってきた。そこで本稿では、開水路流れおよび越流流れに起因する過剰間隙水圧の上昇要因について、理論的に考察した結果を報告する。

2. 開水路流れによる洗掘現象 (実験 I)

2.1 実験概要

実験には、長さ 2.0m×幅 0.3m×高さ 0.3m のアクリル水槽を用いた(図-1(a))。水槽には小型間隙水圧計を設置し、地盤内部の間隙水圧を計測した。間隙水圧計の設置箇所を図-1(b)に示す。流体力は水中ポンプ(120ℓ/min)を用いて循環流を形成し、定常流を再現した。試料には豊浦砂を用い、飽和状態で $D_f=40\%$ になるように堆積させた。豊浦砂の 10%粒径は 0.116mm, 50%粒径は 0.173mm, 透水係数は $2.210 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ($D_f=40\%$) である。

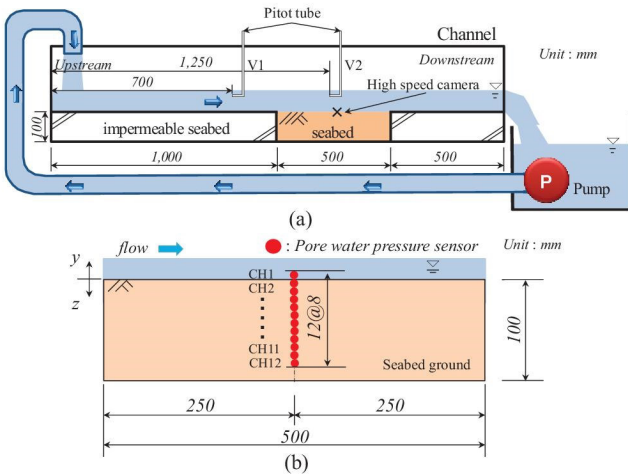


図-1 (a)実験装置の概略図, (b)間隙水圧計の設置位置

2.2 実験結果

1) 洗掘の様子

実験時の洗掘断面の時刻変化を図-2 に示す。地盤表層では、洗掘が発生し、dune と呼ばれる河床波が形成された。この dune は流下方向へゆっくり移動した。このような洗掘現象について、掃流力と地盤内部の間隙水圧変動に着目して考察する。

2) 開水路流れの流速分布

ピトー管および高速度カメラを用いて計測した開水路流れの鉛直流速分布を図-3(左)に示す。計測結果より、無次元掃流力を算出し、限界掃流力との比較を行った。限界掃流力は、岩垣の式²⁾を用いて算出した。その結果、 $\tau^*=0.129$: 移動床上 $> \tau_c^*=0.075$ となり、洗掘が発生する条件であることを確認した。

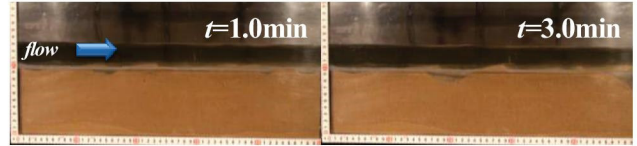


図-2 洗掘断面の時刻変化 (dune の様子)

3) 地盤内部の間隙圧変動

間隙水圧計による計測結果から、地盤内部で過剰間隙水圧が発生することがわかった。過剰間隙水圧の深度方向分布を図-3(右)に示す。地盤表層(G.L.-3mm)において、30Pa 程度上昇し、土槽中央付近(G.L.-60mm)まで 10Pa 程度の上昇が見られる。地盤内に過剰間隙水圧が発生すると、上向きの透水力が生じ、土粒子の有効重量が減少することで洗掘を助長すると考える。

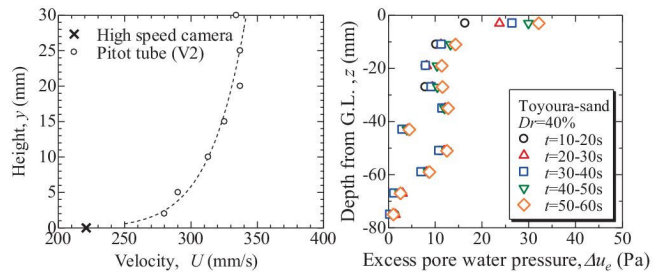


図-3 実験時に計測した開水路流れの鉛直流速分布(左)、過剰間隙水圧の深度方向分布(右)

2.3 過剰間隙水圧の発生機構に関する理論的考察

開水路流れによる地盤内の変動過剰間隙水圧の発生メカニズムについて、開水路流れと地盤の境界面における流速差に着目した。地盤内部の流速は開水路流れに比べて遅いため、流速勾配が生じる。このような流速勾配は地盤表層の土粒子に揚力を発生させると考えられる。そこで、山田・川端³⁾にならない、開水路流れおよび地盤内部の流速を理論的に算出した。開水路流れには式(1)を、地盤内の浸透流速は式(2)を用いた。

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z+z_0}{z_0} + \frac{u_b}{u^*} \quad (1)$$

$$u = \left[\frac{u_b}{\varepsilon} - \left(\frac{Kg \sin \theta}{\varepsilon v F} \right)^{1/2} \right] \exp \left[\left(\frac{\varepsilon v F}{2l^2 K} \right)^{1/3} z \right] + \left(\frac{Kg \sin \theta}{\varepsilon v F} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 z_0 : 底面位置の補正值($z_0=0.00485\text{mm}$)、 u_b : スリップ流速($z=0$ における流速 : 高速度カメラを用いて計測した表層近傍の流速 $u_b=221.3\text{mm/s}$)、 ε : 空隙率($\varepsilon=0.45$)、 ν : 動粘性係数、 θ : 水路勾配($\sin \theta=0.019$)、 d : 豊浦砂の 10%粒径($d=0.116\text{mm}$)、 K : Darcy の抗力項、 F : Forchheimer の抗力項である。 l : 混合距離は、地盤内部の間隙径の大きさと規定されていると考え、神谷ら⁴⁾を参考に間隙径を算出した($l=1.27 \times 10^{-4}\text{mm}$)。次に、地

盤内の速度勾配によって土粒子が受ける揚力から、地盤内に上昇し得る過剰間隙水圧 Δu_e を次式で求めた。

$$\Delta u_e = \rho c_L^* \frac{u_{\max}^2 - u_{\text{opp}}^2}{2} \quad (3)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 u_{\max} : 土粒子上面の流速、 u_{opp} : 土粒子下面の流速、 c_L^* : 粒子レイノルズ数に基づく揚力係数である。以上の式より求めた流速分布を図-4(右)に、 Δu_e の深度方向分布を図-4(右)に示す。地盤表層において Δu_e が発生することが確認できた。実験結果(図-3)と比較すると、同様の傾向は見られるものの、地盤表層部においては、理論値(最大:66Pa)が実験値(最大:32Pa)を過大に評価している。また、実験で計測された土槽中央付近での Δu_e の上昇は得られなかった。これは、流速勾配が地盤表層部のみならず卓越するからである。スリップ流速および地盤内の流速分布について詳細に検証する必要がある。

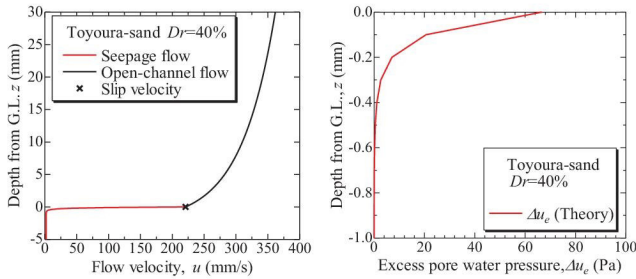


図-4 開水路流れと地盤内の流速の理論値(左)、過剰間隙水圧の理論値(右)

3. 越流れによる背後地盤の洗掘実験 (実験Ⅱ)

3.1 実験装置および実験概要

本実験では、実験Ⅰと同じ水路を用いた。ただし、高さ $h_{\text{weir}} = 80\text{mm}$ の堰を土槽最上流部に設けた。土槽区間の概略図と間隙水圧計の設置位置を図-5に示す。実験初期の堰を隔てた上下流の水位差を Δh と定義し、 $\Delta h = 60\text{mm}$ とした。堆積地盤には、豊浦砂を用い、飽和状態で相対密度 $D_r = 40\%$ とした。

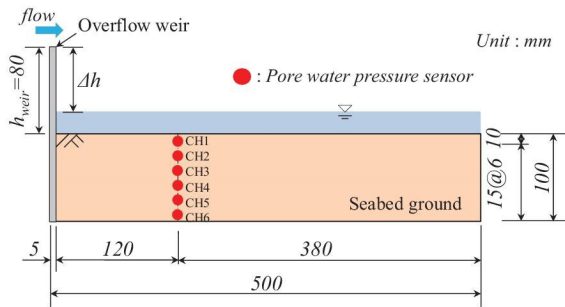


図-5 実験装置の土槽概略図と間隙水圧計の設置位置

3.2 実験結果

図-6(左)に洗掘の時刻変化を、図-6(右)に間隙水圧計 CH6 における実験時の間隙水圧の時刻変化を示す。図-6(右)より、洗掘が進行するにつれて静水圧増加分を上回る過剰間隙水圧が発生することがわかる。そこで、石川⁹⁾にならい、越流れの衝突に起因する動水圧の理論値を算出し、計測された過剰間隙水圧との比較を行った。動水圧の算出には以下の式(4)を用いた。

$$\frac{h}{v_0^2/2g} = \alpha \exp\left\{-\frac{(\beta\xi)^2}{2}\right\} \quad (4)$$

ここで、 h : 動水圧水頭、 v_0 : 水面への突入速度(0.88m/s)、 g : 重力加速度($g=9.8\text{m/s}^2$)、 ξ : 最大動水圧の作用する地点とその分布に関する項、 α 、 β : 水理量から定まる定数である。図-6(右)より、CH6 が洗掘により露出した時刻($t=31\text{s}$)に計測された過剰間隙水圧は 101Pa、理論値は 129.5Pa であり、ほぼ同等であった。よって、越流れの衝突に起因して過剰間隙水圧が上昇するといえる。次に、過剰間隙水圧が洗掘に与える影響を考察するために、一次元的に地盤内の鉛直土被り圧($\sigma = \gamma_w h_w + \gamma_{\text{sat}} h_s$; 記号の定義は図-7 中参照)を算出し、計測した間隙水圧(u)との差をとった有効土被り圧(σ')の変化をみた(図-7)。26 秒経過時に、土被りがあるにも関わらず(約 0.5cm 程度)、 σ' がゼロとなり、液状化に似た状態となっていることがわかった。

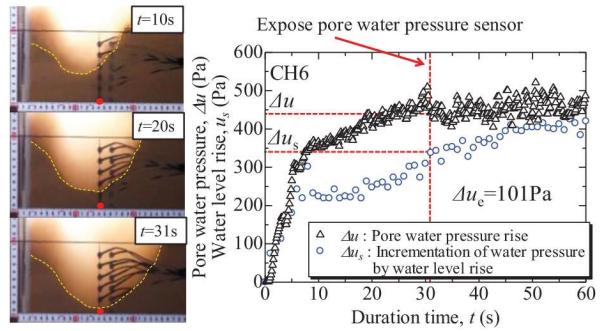


図-6 実験時の洗掘の時刻変化(左)、CH6 の間隙水圧変動(右)

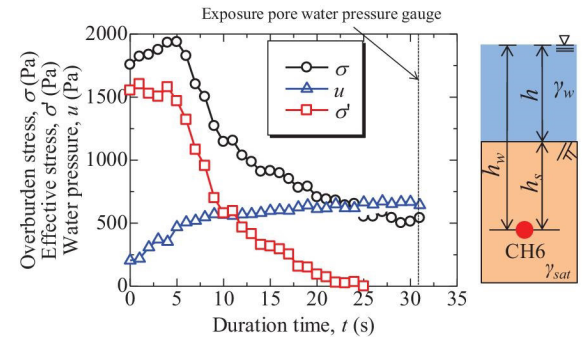


図-7 有効土被り圧と過剰間隙水圧の関係

4. 結論

開水路流れによる洗掘では、開水路流れによって発生する地盤内の流速勾配に起因して過剰間隙水圧が発生することを理論的に示した。また、越流れによる洗掘では、水流の衝突に起因して過剰間隙水圧が発生し、液状化に似た状態となった。このような地盤内部の間隙圧変動が洗掘を助長させると考える。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)23360203 および特別研究員奨励費 (24・9200) の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 今瀬他(2012) : 土木学会論文集B2(海岸工学) ,Vol.68,No.2, pp.836-840.
- 2) 岩垣(1956) : 土木学会論文集, 第41号,pp.1-21.
- 3) 山田・川端(1982) : 土木学会論文報告集, 第325号, pp.81-91.
- 4) 神谷他(1996) : 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp. 189-198.
- 5) 石川(1982) : 土木学会論文報告集, 第327号, pp.99-105.