

間隙空気の挙動に着目した開水路流れによる不飽和地盤の洗掘現象

名古屋工業大学 学生会員 ○伊藤 嘉
名古屋工業大学 正会員 前田 健一
名古屋工業大学 学生会員 今瀬 達也

1. はじめに

津波による洗掘現象については、従来より掃流力の作用に着目することが一般的である。しかし、陸上の不飽和地盤へ急激に津波流が作用する際、これまで考えられてきた洗掘メカニズムで十分説明することができない現象が生じることがある。この要因として、地盤内の間隙空気の挙動が洗掘あるいは構造物被害を拡大させると考える。しかしながら、これまでに土-水-空気の三相系を考慮した洗掘メカニズム解明に関する研究例¹⁾は少なく、現象についていまだ未解明な部分が多い。そこで本研究では、土-水-空気の三相系地盤における洗掘現象について間隙空気の挙動に着目した移動床水路実験を行った。

2. 実験概要

図-1(a)に実験装置概略図を示す。実験では、全長2.0m×幅0.3m×高さ0.3mの亚克力水槽を用いた。水槽上端より1.0mmを起点に長さ0.5m×幅0.3m×深さ0.1mの土槽区間を設け、地盤を作製した。それ以外の区間は不透水床とし、床表面には摩擦を考慮して平均粒径 $D_{50}=0.17\text{mm}$ の豊浦砂を付着させた。地盤内に小型間隙水圧計P306A(SSK社製)を設置し、実験時の間隙水圧の計測を行った。乾燥地盤では、間隙水圧計に細かいメッシュを張り付け、撥水スプレーを塗布することでセンサー受圧部に作用する空気圧のみが計測可能な機器を用い、間隙空気圧を測定した。計測器の設置位置を図-1(b)に示す。流体力には水中ポンプ(120ℓ/min規格)を使用し、循環流を発生させて外力を統一した。堆積地盤には豊浦砂を用い、飽和度($S_r=0,100\%$)および相対密度($D_r=40,60\%$)を変化させて考察した(表-1)。

3. 実験結果

3. 1 無次元掃流力 τ^* の算出

掃流力 τ^* および限界掃流力 τ^*_c による評価を行うため、ピトー管を用いて鉛直流速分布を計測した。計測結果を図-2に示す。ただし、ここでは飽和地盤条件での結果を示す。無次元限界掃流力の算出には岩垣の式²⁾を用いた。その結果、 $\tau^*=0.855$ ：移動床上 $>\tau^*_c=0.075$ となり、洗掘が発生する条件

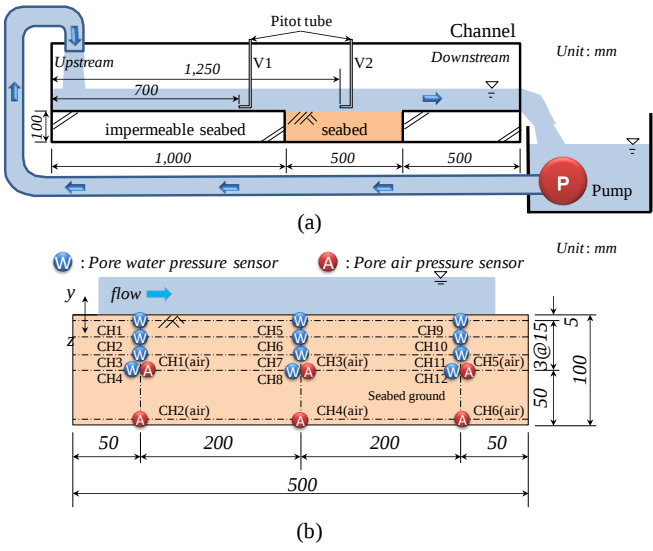


図-1 (a) 実験装置概略図, (b) 計測器の設置位置

表-1 実験ケース

実験ケース	飽和度 $S_r(\%)$	相対密度 $D_r(\%)$
case1	100	40
case2	0	60

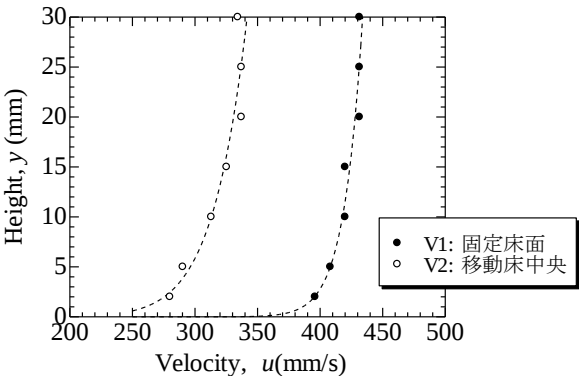


図-2 ピトー管を用いて計測した鉛直流速分布
(地盤条件：飽和)

であることを確認した。

3. 2 試験断面の洗掘の様子

図-3 に試験断面における洗掘の様子を示す。飽和地盤(case1)では、表層にデューンが形成され流下方向へ移動した。一方、乾燥地盤(case2)では、地盤表層から間隙空気塊が噴出した。この空気塊の噴出によって砂を巻き上げ、表面が乱

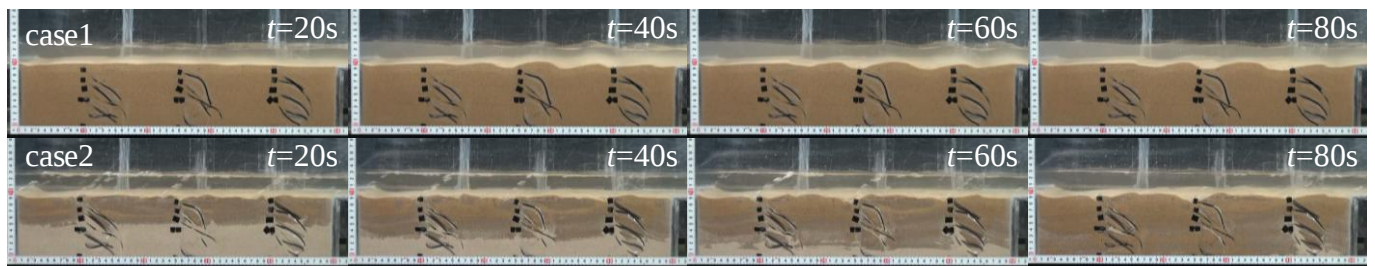


図-3 試験断面の洗掘の様子：上図は case1（飽和地盤），下図は case2（乾燥地盤）の時刻歴を示す。

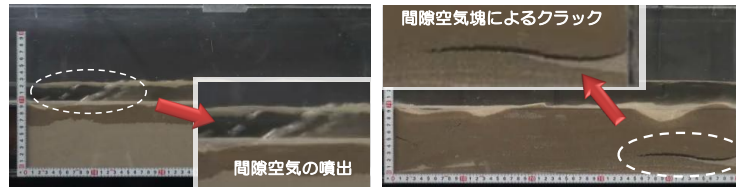


図-4 case2 における間隙空気の噴出する様子（左図），間隙空気塊によるクラック（右図）

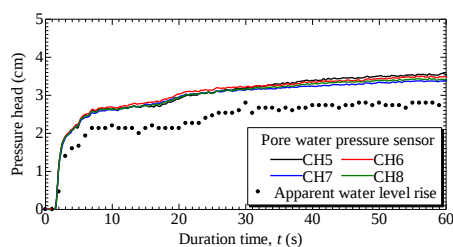


図-5 case1 における間隙水圧の時刻歴

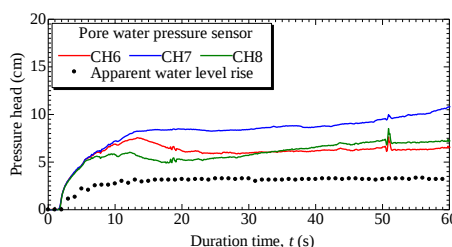
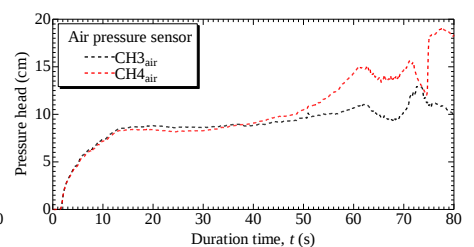


図-6 case2 における間隙水圧（左図）および間隙空気圧（右図）の時刻歴



されることで洗掘が発生および拡大する切欠となった。この空気塊の噴出は浸潤前面が土槽下部へ進行するに従って減衰した。また、地盤内部へ閉じ込められた空気塊によって、クラックが発生する現象も確認した(図-4)。以上より、地盤の飽和度の違いによって洗掘現象が異なることがわかった。特に、乾燥地盤では掃流力の作用に加えて間隙空気の挙動が洗掘現象に影響を与えることが示唆された。

3. 3 地盤内部の間隙圧の変化

図-5 に case1 における間隙水圧の時刻歴を、図-6 に case2 における間隙水圧と間隙空気圧の時刻歴を示す。それぞれの圧力は水頭に変換して示している。図-5 より、飽和地盤へ開水路流れが作用すると、見かけの水位上昇量を上回る間隙水圧が発生し、地盤表層部に圧力勾配が生じることがわかる。これは、砂層内の浸透流と開水路流との境界面において、浸透流速が開水路流の流速に比べて遅いために生じる流速勾配に起因して間隙水圧勾配も生じたと考える。一方、乾燥地盤における間隙水圧および間隙空気圧の変化(図-6)を見ると、見かけ水位の上昇に伴って土槽全体で一様に圧力が上昇することがわかる。このとき、見かけの水位上昇量が 3cm 程度に対して 7cm 程度まで圧力が上昇した。その後、実験開始から 50 秒経過後より、最下層に設置した CH4(air)において、さらに間隙空気圧が上昇した。上昇

量は最大で 18cm 程度であった。この乾燥地盤における間隙圧の上昇は、地表面からの急激な浸透作用が浸潤水と間隙空気のスムーズな置換を妨げ、非浸潤領域に間隙空気が封入されること起因すると考える。さらに間隙空気が浸潤前線に捉えられ、空気塊として圧縮されることで、図-4 に示すような空気塊の噴出やクラックを発生させると考える。

4. 結論

不飽和地盤に開水路流れが作用する際、地表面からの急激な浸透作用により、浸潤水と不飽和地盤内の間隙空気が置換され、地表面に噴出することで洗掘を助長した。さらに浸透が進行するに従い、間隙空気のスムーズな置換が阻害され、地盤内に封入された間隙空気が圧縮されながら蓄積し、やがて地盤内にクラックを発生させるまでに至った。今後は、間隙空気による地盤の不安定化を考慮した、地盤上に施工された構造物（例えば、防潮堤やアスファルト舗装）への影響も踏まえて検討する。

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、深謝の意を表します。

参考文献：1)今瀬達也 他(2012):土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp836-840. 2) 岩垣雄一(1956):土木学会論文集, 第 41 号, pp.1-21.