

高速流体の作用に伴う間隙圧の変化に着目した洗掘現象の実験的考察

Experimental study on scouring with change in pore pressure due to high-speed fluid

伊藤 嘉¹, 今瀬 達也², 前田 健一³

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・博士前期課程・社会工学専攻

2 名古屋工業大学大学院・工学研究科・博士後期課程・社会工学専攻

3 名古屋工業大学大学院教授・工学研究科・E-mail:maeda.kenichi@nitech.ac.jp

概 要

津波による構造物周辺の洗掘現象は、支持力を低下させ、大規模な被害を発生させる。これまでの洗掘現象に対する評価は、掃流力の概念を用いることが一般的である。しかし近年、掃流力に加え、地盤内の応力変化により洗掘規模を一層拡大させることが指摘されている。そこで、本研究では、異なる地盤条件下における地盤内の応力変化に着目し、開水路流れおよび越流に伴う洗掘に焦点を当てた水路実験により洗掘のメカニズム解明を試みた。開水路流れによる洗掘実験では、飽和地盤において流体力が作用する際、地盤表層では過剰間隙水圧が発生し、洗掘の進行を促すことがわかった。また、不飽和地盤では、間隙空気が地盤外に噴出し、噴出孔が切欠となり洗掘が進行した。越流に伴う洗掘実験では、越流水塊による衝撃力が洗掘規模に大きく起因した。また、衝撃力を受ける地盤下では過剰間隙水圧が発生し、液状化に似た状態となり洗掘現象を助長させることがわかった。

キーワード：洗掘，津波，間隙圧，衝撃力

1. はじめに

津波による洗掘現象は、大規模な地形変化や海岸構造物の支持力低下をもたらし、甚大な被害を発生させることがある。2011年3月に発生した東日本大震災においては、海岸構造物周辺の地盤が洗掘されたことで、海岸構造物の耐波機能が低下し、被害を発生・拡大した被災ケースが考えられる。洗掘現象については、これまでに河川・海岸工学分野において勢力的に研究が進められている。これまでの研究¹⁾²⁾では、流体力によって地盤表層へ作用するせん断力と地盤表層の土粒子の有効重量との力学的つり合い条件に着目した掃流力の概念や、渦の発生による土粒子の浮遊現象に着目して洗掘現象のメカニズムを説明することが一般的である。しかし、実際に被災した海岸構造物周辺の地盤洗掘の規模を踏まえると、地盤表層に着目した掃流力の作用のみでは、洗掘現象を評価することができないと考える。近年の研究においては、例えば、津波のような高速で作用する流体力の影響は、地盤表層のみではなく地盤内部に応力変化を生じさせ、洗掘を助長させる影響も指摘されている³⁾。さらに、1993年に発生した北海道南西沖地震による津波被害報告⁴⁾以降、津波による海岸構造物の被災メカニズムを検討する上での重要な項目として、津波

力を受ける海岸構造物直下の捨石マウンドとそれを支持する海底地盤の挙動が新たに挙げられている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。このような、津波、構造物に加えて、海底地盤や捨石マウンドの力学的相互作用に着目した現象をより定量的に評価するためには、海岸工学で得られている知見に、地盤工学における知見を加え、新たに洗掘メカニズムを考える必要があると考える。

そこで本研究では、従来より考察されてきた掃流力の知見に加えて、新たに地盤内部の応力変化に着目した移動河床実験を実施した。実験では、水平堆積地盤に開水路流れを作用させた洗掘実験(実験 1)、堰を越流した際の落水水塊による堰背後地盤の洗掘実験(実験 2)、防波堤直下の捨石マウンドを浸透する流体力による洗掘実験(実験 3)を実施した。

2. 実験概要および実験装置

実験では、長さ 2.0m×幅 0.3m×深さ 0.3m のアクリル水槽を用いた。水槽上流より 1.0m を起点に、長さ 0.5m×幅 0.3m×深さ 0.1m の土槽区間を設置し、地盤を堆積させた。それ以外の区間は、不透水性の海底床とし、海底床区間の表面には、海底面の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。流体挙動は、2種類の水中ポンプ (120/min

規格と100/min 規格)を用いて循環流を形成した。実験時には、小型間隙水圧計により地盤内部の間隙水圧の計測を行った。各実験における間隙水圧計の設置位置および装置の概略図は各章で詳細を示す。また、ビデオカメラ(29.97fps)を用いて現象の撮影を行った。

堆積地盤には、豊浦砂と2種類の礫材 A,B の3種類を用いた。粒径加積曲線を図1, 平均粒径および透水係数を表1に示す。実験において豊浦砂を用いる場合は、水中落下法(飽和状態)および気中落下法(乾燥状態)により地盤を作製した。密地盤を作成する際は、突き棒で突き固めて所定の相対密度になるように管理した。

3. 開水路流れによる水平堆積地盤の洗掘実験 (実験1)

3.1 実験装置概要および実験ケース

実験1で用いた実験装置の概略図および間隙水圧計の設置位置を図2(a),(b)に示す。また、表2に実験ケースを示す。実験では、豊浦砂および礫材Bを用い、豊浦砂については相対密度($Dr=40,60,70\%$)と飽和度($Sr=0,17.7,100\%$)を変化させ、その影響を考察した。流体挙動は120/min 規格の水中ポンプを用いて、外力を統一した。

3.2 無次元掃流力の算出

掃流力および限界掃流力を評価するため、ピトー管を用いて鉛直方向の流速分布を計測した。その結果を図3(a)に示す。次に、無次元掃流力を算出するため Prandtl-Karman の対数分布則を用いて摩擦速度 u^* を算出した⁸⁾。

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k} \quad (1)$$

ここに、 κ は Karman 定数($\kappa=0.4$), k は相当粗度($k=0.2$),

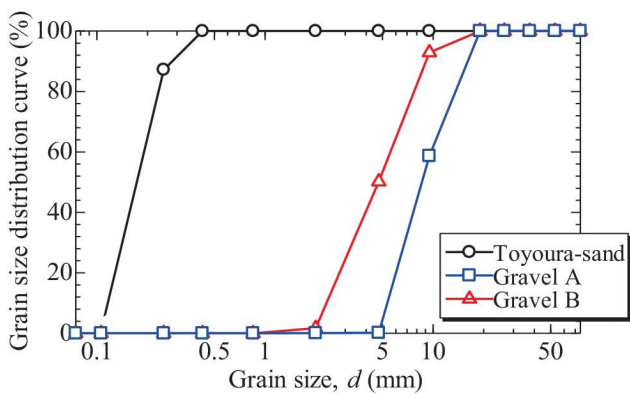


図1 実験で用いた豊浦砂および礫材 A,B の粒径加積曲線

表1 実験に用いた地盤材料の平均粒径および透水係数

地盤材料	豊浦砂	礫材 A	礫材 B
平均粒径 D_{50} (mm)	0.173	8.57	4.73
透水係数(cm/s)	2.21E-02(緩) 1.48E-02(密)	4.22E-02	4.16E-02

A_r は実験定数である。横軸に y , 縦軸に u をとった片対数グラフ(図3(b))において、計測結果が直線となる範囲に式(1)を適用し u^* を求めた。式(1)で算出した u^* を次式に代入し、無次元掃流力 τ^* を算出した。

$$\tau^* = \frac{u^{*2}}{sgd} \quad (2)$$

ここに、 s は水中比重($s=1.65$), g は重力加速度, d は砂の平均粒径 D_{50} を用いることとした。

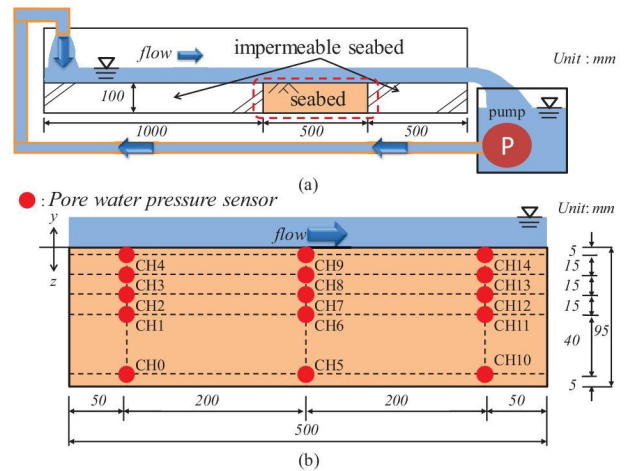


図2 実験装置概略図(a),間隙水圧計の設置位置(b):(実験1)

表2 実験ケース(実験1)

実験ケース	地盤材料	飽和度 $S_r(\%)$	相対密度 Dr (%)
Case1-(No.)			
Case1-1	豊浦砂	100	40
Case1-2	豊浦砂	100	70
Case1-3	礫材 B	100	-
Case1-4	豊浦砂	17.7	60
Case1-5	豊浦砂	0	60

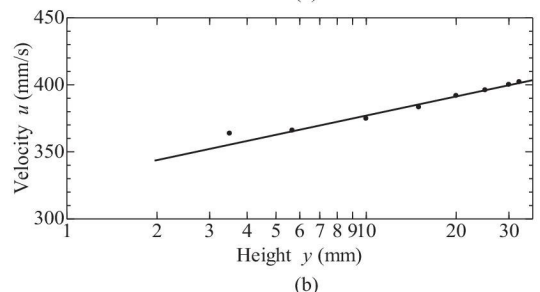
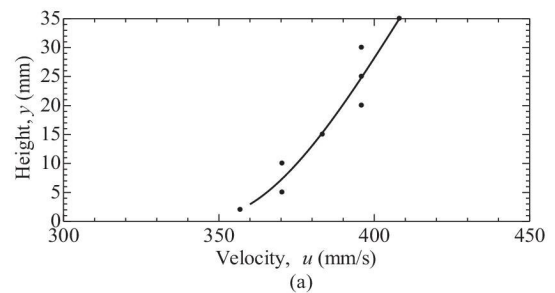


図3 ピトー管を用いて計測した鉛直流速分布(a),縦軸に流速 u , 横軸に y をとった片対数グラフ(b)

さらに、土砂が移動を開始する無次元限界掃流力 τ_c^* を岩垣の式⁹⁾を用いて計算し、無次元掃流力 τ^* との比較を行った。その結果、豊浦砂では、 $\tau^*=1.030 > \tau_c^*=0.300$ となり、実験において洗掘が発生した。一方、礫材 B では、 $\tau^*=0.002 < \tau_c^*=0.050$ となり、実験において洗掘は発生しなかった。よって次節からは、豊浦砂について考察する。

3.3 洗掘の様子

飽和状態で相対密度 $Dr=40\%$ (Case1-1)および $Dr=70\%$ (Case1-2)の実験時の様子を図4に示す。両者について、洗掘量に大きな違いは見られないが、洗掘発生後、下流方向への洗掘の進行速度は密な地盤(Case1-2)に比べて緩い地盤(Case1-1)の方が速いことを目視による観測で確認した。次に、津波が陸上へ遡上した際を想定し、乾燥地盤に開水路流れが作用した様子(Case1-5)を図5に示す。実験開始直後は、堆積地盤内部の間隙空気が地盤表層からの浸潤水に置換され、地盤表面から噴き出すエアブローが発生した。その噴き出しは洗掘を発生・拡大させる切欠となった。その後、エアブローは徐々に減衰していき、実験開始より2分経過後にはほぼ終息した。

実験開始より3分経過後には、土槽内部に閉じ込められた空気塊によって地盤内にクラックを発生させた。この現象を踏まえると、津波が陸上へ遡上した際の洗掘現象には、流体力の作用に加えて間隙空気の影響も考慮しなくてはならないことがわかった。以上の結果は、掃流力の概念では説明ができず、掃流力に加えて、洗掘現象に影響を与える別の要因について検討する必要がある。そこで次節では、地盤内部の変化に着目して考察する。ただし、本稿では、まず間隙水圧のみの影響に着目し、飽和状態における実験ケースについて考察した。

3.4 地盤内部の応力変化

Case1-1 および Case1-2 の実験時に計測した間隙水圧の時刻変化を図6(a),(b)に示す。本稿では境界面の影響が極めて小さいと考えられる土槽中央の間隙水圧計(CH5~CH9)で計測した結果を示す。流体力が作用すると、両実験ケースともに、水位上昇による水圧上昇値(図6中の青破線)に加え、過剰間隙水圧の発生を確認した。地盤表層部にのみ過剰間隙水圧が発生する密地盤(Case1-2)と比べて

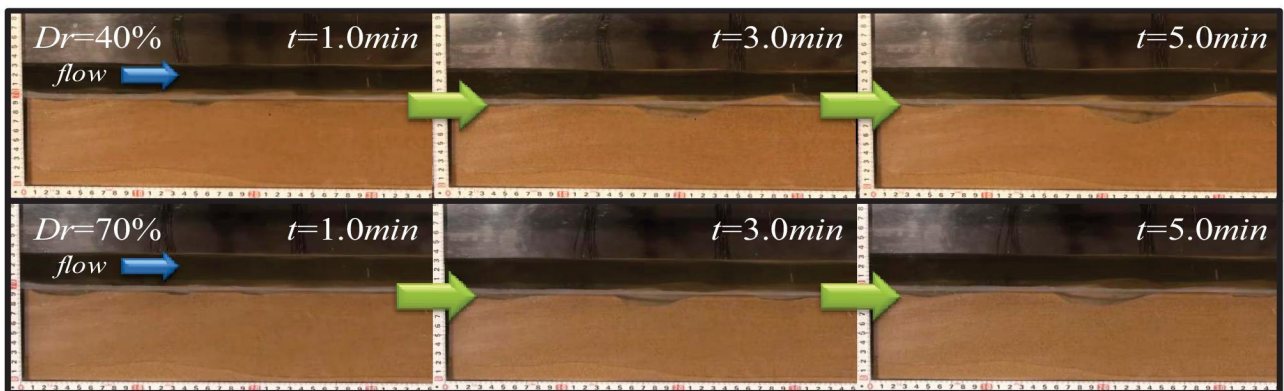


図4 飽和堆積地盤に開水路流れが作用した際の様子：Case1-1(上),Case1-2(下)



図5 乾燥地盤に開水路流れが作用した際の様子：Case1-5

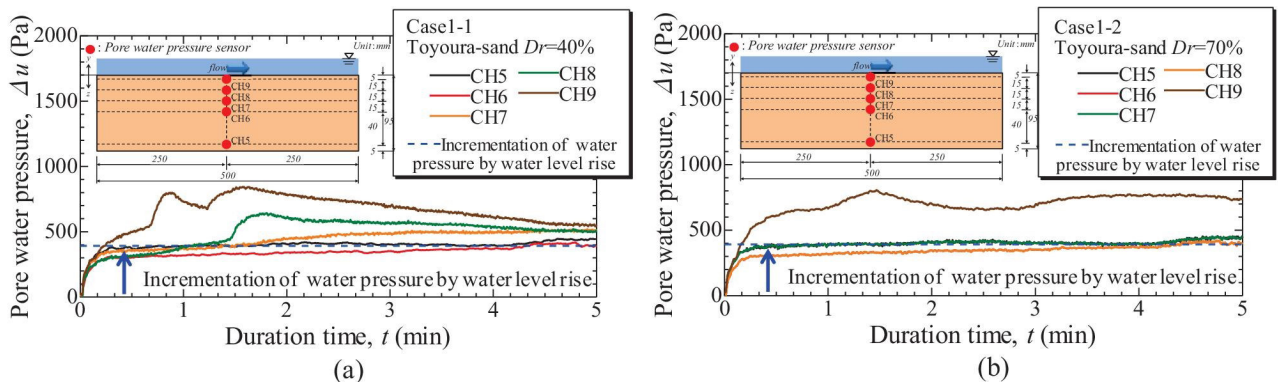


図6 実験時に計測した間隙水圧の時刻変化の様子：Case1-1(a),Case1-2(b)

緩い地盤(Case1-1)では土槽中層部($z=35\text{mm}$)の地点まで過剰間隙水圧が発生した。よって、掃流力の作用に加えて、この過剰間隙水圧の発生が堆積地盤の強度を低下させ、洗掘現象を助長させるの一つの要因ではないかと考える。

4. 越流水塊の落下による堰背後地盤の洗掘実験(実験2)

4.1 実験装置概要および実験ケース

実験2で用いた実験装置の概略図および間隙水圧計の設置位置を図7(a),(b)に示す。また、実験ケースを表3に示す。本実験では、土槽上部に $h_{weir}=80\text{mm}$ の越流堰を設けて越流現象を再現した。また、水路最下流部に止水壁を設け、この止水壁の高さを変化させて、越流堰より下流部の水位を調整した。流体挙動には、実験1と同様に水中ポンプ(120l/min 規格)を使用して循環流を形成し、外力を統一した。実験では、越流堰より上流と下流の初期水位差を変化させ、水塊の落下高さの変化による影響を考察した。本稿では、初期水位差を Δh と定義した。地盤条件は、実験1と同様に豊浦砂および礫材Bを用いて、飽和度($S_r=0\%$, 100%)および相対密度($D_r=40\%$, 60% , 70%)を変化させた。

4.2 洗掘の様子

(a) 飽和度の影響

$\Delta h=80\text{mm}$ で地盤条件を変化させた Case2-1~Case2-3 を図8に、 $\Delta h=20\text{mm}$ で地盤条件を変化させた Case2-7~Case2-9 を図9に示す。

$\Delta h=80\text{mm}$ について、まず、豊浦砂の飽和度の違い(Case2-1 と Case2-2)に着目すると、目視での観察する限りは水平方向の洗掘の広がりには若干の違いが見られたが、鉛直方向の最大洗掘深の進行にあまり違いは見られない。この結果から、堆積地盤の飽和度の影響ははばないといえる。次に、豊浦砂と礫材の粒径の違い(Case2-1 と Case2-3)に着目

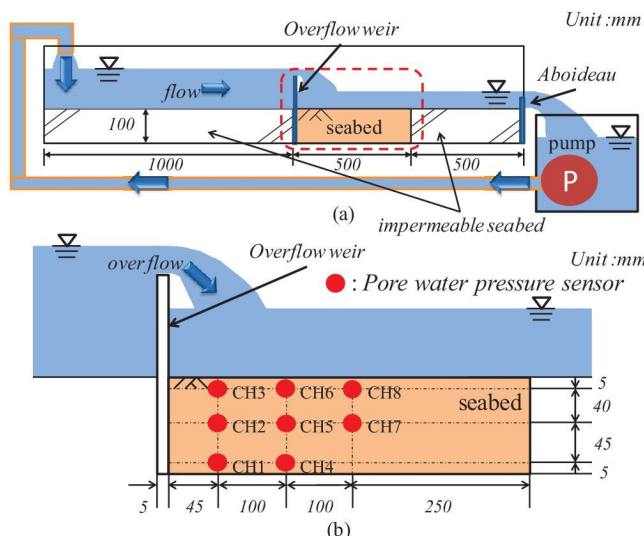


図7 実験装置概略図(a),間隙水圧計の設置位置(b): (実験2)

表3 実験ケース(実験2)

実験ケース	Δh (mm)	地盤材料	飽和度 S_r (%)	相対密度 D_r (%)
Case2-(No)				
Case2-1	80	豊浦砂	100	40
Case2-2	80	豊浦砂	0	60
Case2-3	80	礫材B	100	-
Case2-4	40	豊浦砂	100	40
Case2-5	40	豊浦砂	100	70
Case2-6	40	礫材B	100	-
Case2-7	20	豊浦砂	100	40
Case2-8	20	豊浦砂	100	70
Case2-9	20	礫材B	100	-
Case2-10	0	豊浦砂	100	40
Case2-11	0	豊浦砂	100	70
Case2-12	0	礫材B	100	-

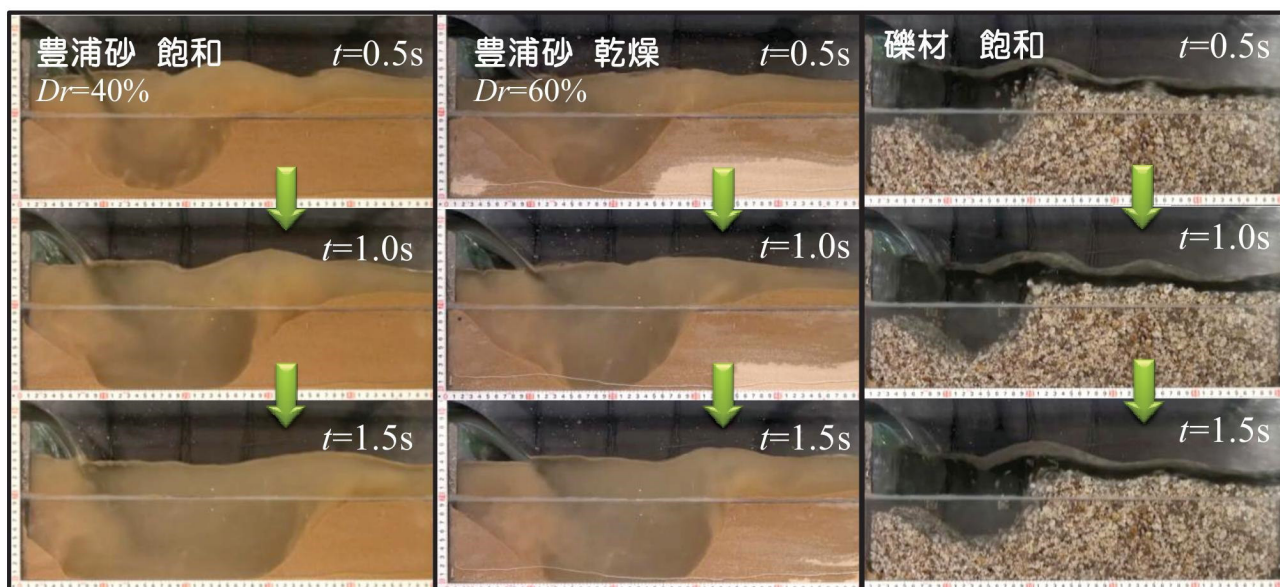


図8 $\Delta h=80\text{mm}$ における実験の様子: Case2-1(左),Case2-2(中央),Case2-3(右)

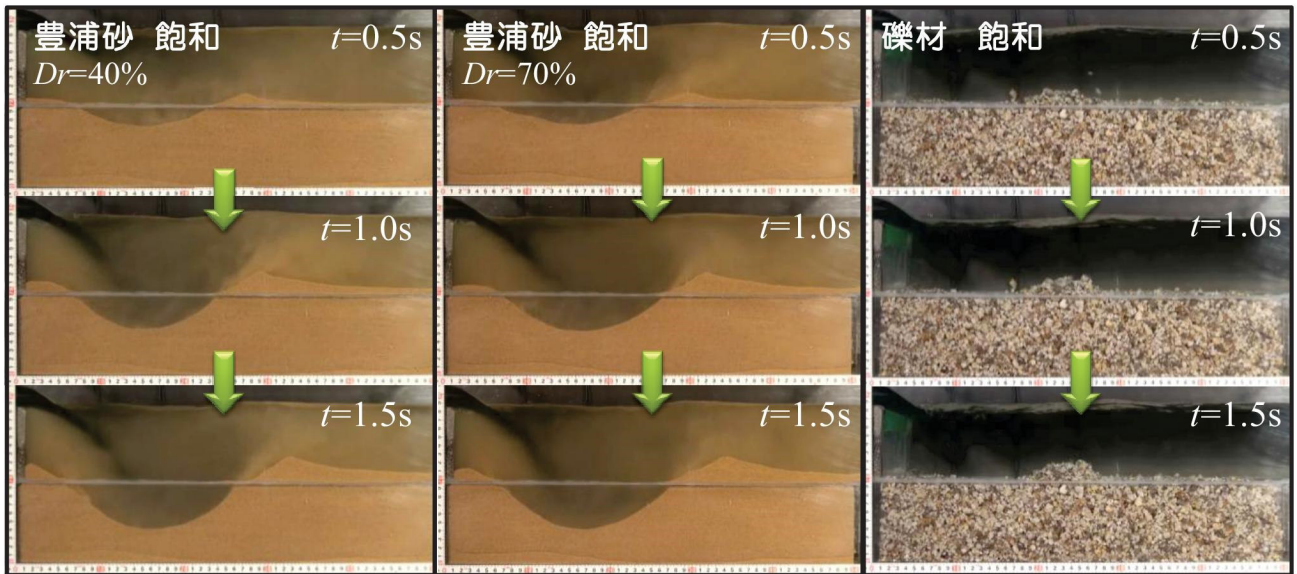


図 9 $\Delta h=20\text{mm}$ における実験の様子：Case2-7(左),Case2-8(中央),Case2-9(右)

すると、鉛直方向の最大洗掘深および水平方向の洗掘の広がりに変化が見られた。この結果から、堆積地盤の粒径について考慮する必要がある、土粒子個々に作用する流体力と土粒子の有効重量のつり合いによる掃流力の概念が重要となる。

$\Delta h=20\text{mm}$ について、まず、相対密度の違い(Case2-7 と Case2-8)に着目すると、目視で観察する限りは洗掘現象に大きな変化は見られなかった。この結果から、堆積地盤の相対密度の影響はほぼないといえる。一方、前述した $\Delta h=80\text{mm}$ の場合と同様に、粒径の違い(Case2-7 と Case2-9)により洗掘現象に変化が見られた。

次に、初期水位差 Δh の変化に着目すると、 Δh が大きいほど、洗掘の規模も大きくなるのがわかる。これは、越流による水塊の落下エネルギーに起因すると考える。

以上の結果から、越流による洗掘現象には堆積地盤の粒径および水塊の落下エネルギーに起因して現象が異なることがわかった。そこで次項では、粒径・水塊の落下エネルギーに着目した洗掘メカニズムの解明を試みる。現象を明確化するため本稿では、飽和状態に焦点を絞って考察した。

(b) 粒径および初期水位差が最大洗掘深に与える影響

前述に示した通り、粒径および初期水位差 Δh の変化が洗掘現象に影響することがわかった。そこで、ある時刻の最大鉛直洗掘深 D を計測し、落下エネルギーによる影響を考察するため、初期水位差 Δh で除した無次元最大洗掘深を求めた。図 10(a)に相対密度 $Dr=40\%$ の豊浦砂、図 10(b)に礫材 B の無次元洗掘深の時刻変化を示す。両材料において、初期の洗掘進行速度は、初期水位差 Δh と $h_{weir}/2$ の大小関係による依存が大きく、その後は初期水位差 Δh が小さくなるほど、洗掘速度が遅くなるのがわかる。これは、堰背後に水が存在することで、越流による水塊の落下エネルギーを吸収するクッションとなることに起因すると考える。

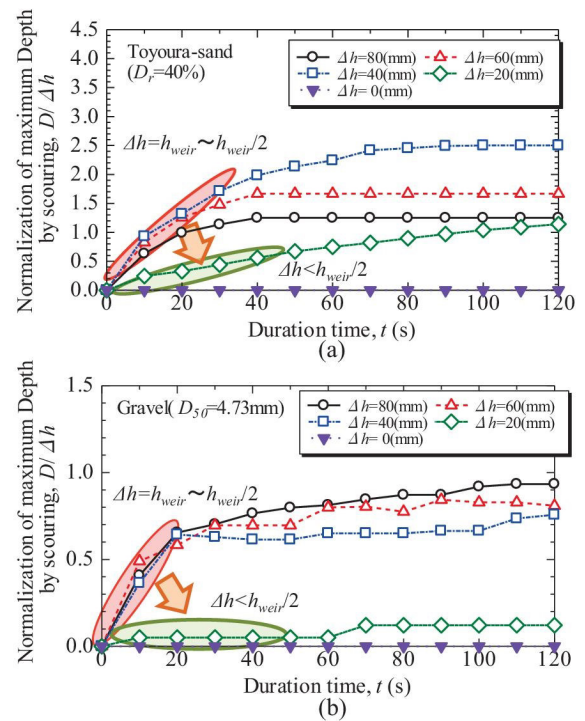


図 10 無次元最大洗掘深の時刻変化：豊浦砂(a),礫材 B(b)

(c) 地盤内部の応力変化

土槽内部に設置した間隙水圧計(CH5)で計測した間隙水圧の変動分 Δu の時刻変化の様子を図 11 に示す。礫材 B を用いた場合には、設置したすべての間隙水圧計において洗掘の有無に関係なく、同程度の水圧上昇が発生した。一方、豊浦砂を用いた場合は、実験初期に越流による水位上昇分の水圧上昇が見られるが、洗掘が進行するにつれて過剰間隙水圧が発生し、その後、洗掘により間隙水圧計が露出する傾向が見られた。以上の結果から、堆積地盤の粒径の違いにより、地盤内部の間隙水圧の上昇傾向に影響を与えることがわかった。そこで、豊浦砂を用いた Case2-7 に

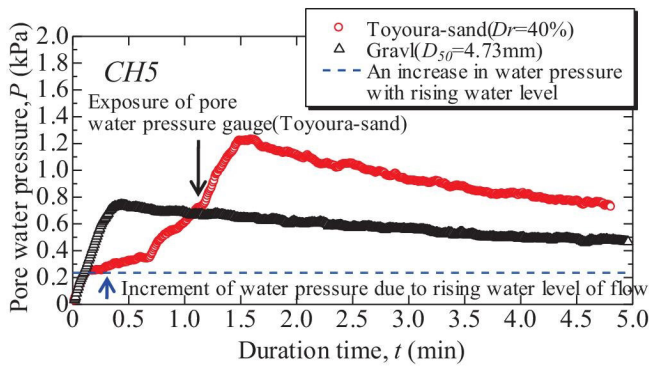


図 11 Case2-7,Case2-8 実験時におけるの間隙水圧変動(CH5)

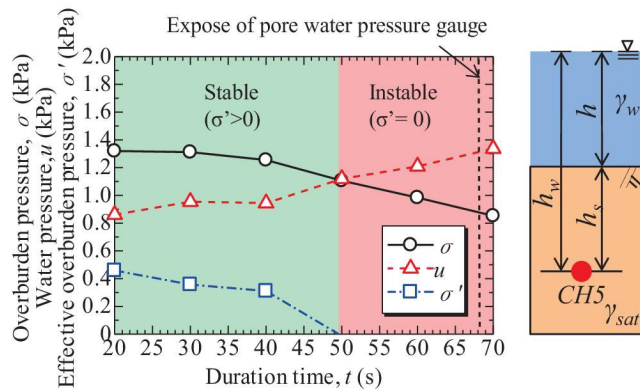


図 12 Case2-4における土被り圧, 有効土被り圧, 間隙水圧の時刻変化(左)と深度記号の定義(右)

ついて、実験時に撮影した画像をもとに一次的に地盤の土被り圧($\sigma = \gamma_w h + \gamma_{sat} \cdot h_s$; 記号の定義は図 12 中参照)を計測し、間隙水圧(u)との差をとった鉛直有効土被り圧(σ')の変化について検証した(図 12(左)). 実験開始 20 秒経過後から過剰間隙水圧が発生し、49 秒経過時に有効土被り圧(σ')がゼロとなり、液状化に似た状態になった後、68 秒経過後に間隙水圧計が露出したことわかった. 以上の結果から、越流水塊の落下に起因する地盤表層への衝撃力の作用に加えて、地盤内の有効土被り圧が減少し、堆積地盤が液状化に似た状態となることで、土粒子が浮遊し洗掘されやすい状態となっている可能性がある.

5. 構造物直下の浸透力による洗掘実験(実験 3)

5.1 実験装置概要および実験ケース

本実験で用いる実験装置の概略図および間隙水圧計の設置位置を図 13(a),(b)に示す. また、実験ケースを表 4 に示す. 土槽上部には捨石マウンドおよび防波堤を模擬した混成堤模型を設置した. 捨石マウンド内を浸透する流体力による洗掘現象に焦点を絞るため、越流は許さず、防波堤模型と捨石マウンドは固定した. 捨石マウンドの高さは 20mm とした. また、水路最下流部に止水壁を設け、この止水壁の高さを変化させることで、実験初期の水位を調整した. 流体挙動は水中ポンプ(100l/min 規格)を用いて循環流を作用させた. 実験では、堆積地盤の条件の変化および

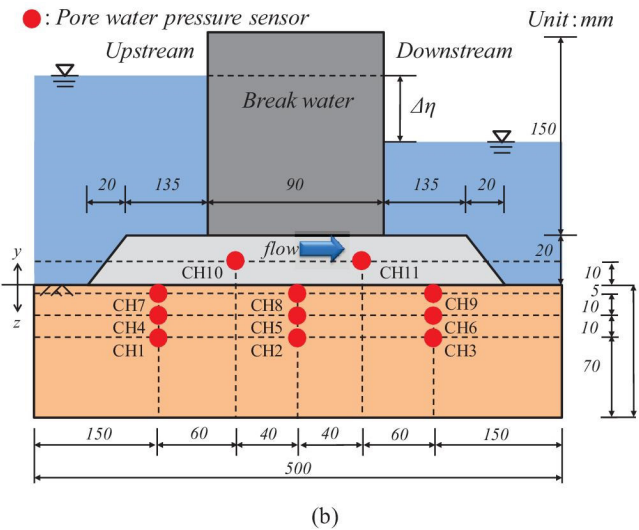
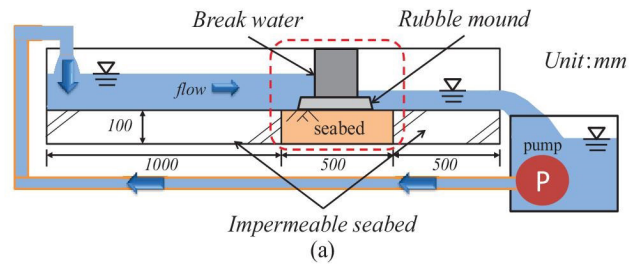


図 13 実験装置概要図(a),間隙水圧計設置位置(b):(実験 3)

表 4 実験ケース(実験3)

実験ケース	初期水位 (mm)	地盤材料 (土槽)	相対密度 D_r (%)	捨石マウンド 材料
Case3-(No)				
Case3-1	80	豊浦砂	40	礫材 A
Case3-2	80	豊浦砂	40	礫材 B
Case3-3	80	礫材 B	-	礫材 B
Case3-4	20	豊浦砂	40	礫材 A
Case3-5	20	豊浦砂	40	礫材 B
Case3-6	20	礫材 B	-	礫材 B

捨石マウンドの粒径、初期水位を変化させて、その影響を考察した.

5.2 洗掘の様子

海底地盤に $D_r=40\%$ の豊浦砂、捨石マウンドを礫材 B で作製し、初期水位を 80mm と 20mm に変化させた Case3-2 と Case3-5 の実験の様子を図 14 および図 15 に示す. 実験時に防波堤を隔てて上流と下流で生じた水位差を本稿では、 $\Delta\eta$ と定義した. この水位差 $\Delta\eta$ による流下方向への水の流れは、堆積地盤に比べて透水性の高い捨石マウンドへ浸透すると考えられる.

初期水位を 80mm とした Case3-2 では、実験開始より 15 秒経過後に $\Delta\eta$ が 50mm となり、防波堤模型より下流へ豊浦砂が噴砂した. これと同時に、防波堤模型上流側の地盤表層部に洗掘の発生が見られた. この洗掘は、上流から下

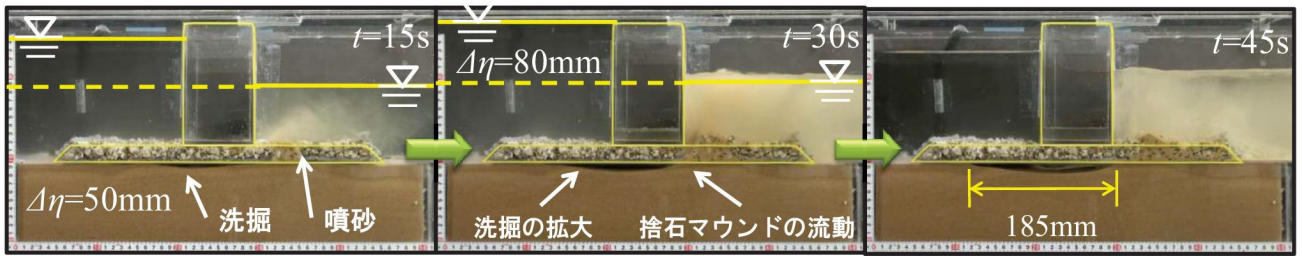


図 14 実験の様子：Case3-2

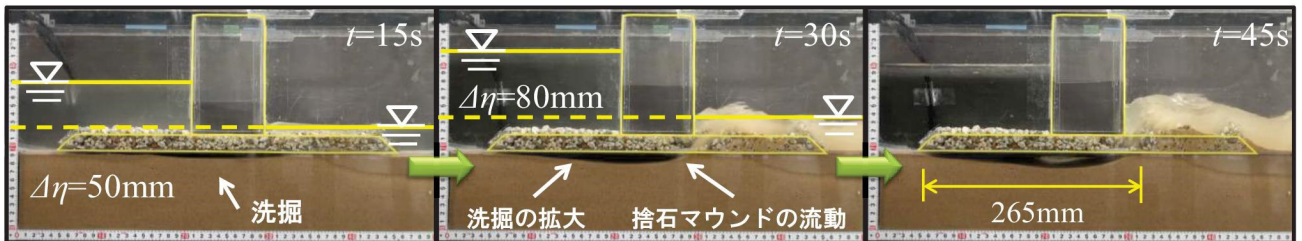


図 15 実験の様子：Case3-5

流へ流下する際、主として捨石マウンドを通過する流体が捨石マウンド内の流下能力を上回ることで、透水性が捨石マウンドより低い海底地盤へと浸透しようとする際に生じる掃流作用および浸透作用によるものと考えられる。その後、時間の経過とともに水位差 $\Delta\eta$ は大きくなり、同時に洗掘が大きく拡大した。実験開始より 30 秒経過後に、水位差 $\Delta\eta$ は 80mm で最大となり、防波堤模型より下流側の捨石マウンドの噴石、変形が見られた。この噴石、変形が切欠となり、捨石マウンドに流動が生じた。また、初期水位を 20mm とした Case3-5 においても Case3-2 と同様な洗掘の発生、拡大の様子が見られたが、地盤表層の洗掘の拡大する速度は Case3-2 と比べて速いことがわかる。さらに、実験開始から 45 秒経過後の地盤表層の洗掘の様子を比較すると、上流方向への洗掘規模に大きな変化が見られた。

以上の現象を踏まえると、防波堤模型より上流側の地盤洗掘の発生および防波堤模型直下の捨石マウンドの流動現象は $\Delta\eta$ の大小関係による影響が大きく、一般的な浸透破壊に似た現象であることがわかった。しかし、地盤表層の洗掘の速度および規模については、初期水位の違いによる水位の変化に起因して現象が異なることがわかった。つまり、防波堤模型直下を浸透する流体力による影響を考慮する必要がある。さらには、前途に示したような、高速で作用する流体力に起因する地盤内部の応力変化が洗掘現象に与える影響も無視できないと考える。そこで今後は、この洗掘規模の違いを説明するため、掃流力の概念に加えて、地盤内部の応力変化に着目した洗掘メカニズムの解明を試みる。

6. 結言

移動河床水路を用いた高速流体による地盤洗掘メカニズムの解明を試みた。実験の結果、以下の結論を得た。

地盤表層に作用する開水路流れにより飽和地盤内部に過剰間隙水圧が発生し、洗掘現象を助長させることがわか

った。この傾向は緩い地盤ほど顕著であった。乾燥地盤では、浸潤水と間隙空気が置換する過程において、地盤内の間隙空気が地盤表層へと噴出するエアブロー現象を確認した。さらに、急激な水の浸透によって、地盤表層からの置換を妨げられた間隙空気は空気塊となり地盤内部に亀裂を生じさせた。この現象を踏まえると、陸域では飽和地盤である可能性が高いため、陸上における洗掘では空気の影響も考慮する必要がある。

越流による背後地盤の洗掘現象は、水塊の落下高さおよび背後地盤の粒径の違いが鉛直洗掘深に大きく影響を与えることがわかった。また、落下水塊による背後地盤への衝撃力は、地盤直下に過剰間隙水圧を発生させ、液状化に似た状態となることがわかった。これにより、地盤強度を低下させ、洗掘を助長させると考える。

構造物直下の捨石マウンド、海底地盤内に生じる浸透力による洗掘現象は、堆積地盤に比べて透水性の高い捨石マウンドを浸透する流体力によって、堆積地盤が洗掘されることを確認した。捨石マウンドにおいても、流体力の作用による噴石が切欠となり、捨石マウンドが変形や流動に至る現象を確認した。以上より、高速で作用する流体力に起因する洗掘現象は、これまでに考察されてきた掃流力の作用に加えて、地盤内部に応力変化を生じさせ、洗掘現象を助長する可能性あることを示すとともに、今後検討する必要があることがわかった。

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 と基盤研究(B)21360222 の助成を受けたものである。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文集, 第 206 号, pp.59-69,1972

- 2) 野口賢二・佐藤慎司・田中茂信(1997)：津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験、海岸工学論文集，第44巻，pp.296-300.1997
- 3) 三宅達夫，澤田豊，角田紘子，鶴ヶ崎和博，前田健一，今瀬達也：遠心力場における津波による洗掘の相似則に関する一考察(その2)，第46回地盤工学研究発表会講演要旨集，pp2012-2014,2011
- 4) 稲富隆昌，上部達生，井合進，風間基樹，山崎浩之，松永康男，関口信一郎，水野雄三，藤本義則：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.0791,1994
- 5) 三宅達夫，角田紘子，前田健一，坂井宏隆，今瀬達也：津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用，海洋開発論文集，第25巻，pp.87-92.,2009
- 6) 今瀬達也，前田健一，三宅達夫，鶴ヶ崎和博，澤田豊，角田紘子：津波力を受ける捨石マウンドー海底地盤の透水現象に着目した海岸構造物の安定性，土木学会論文集，A2(応用力学)，Vol. 67,No.1,pp. 133-144.,2011
- 7) 今瀬達也，前田健一，三宅達夫，鶴ヶ崎和博，澤田豊，角田紘子：捨石マウンドー海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol. 67, No 2,pp. I_551-I_555.,2011
- 8) 高橋智幸，黒川貴博，藤田将孝，島田広昭：津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験，土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol.67,No.2,I_231-I_235,2011
- 9) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的実験(I)限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号,pp1-21,1956
- 10) 高橋重雄，戸田和彦，菊池喜昭，菅野高弘，栗山善昭，山崎浩之，長尾毅，下迫健一郎，根木貴史，菅野甚活，富田孝史，河合弘泰，中川康之，野津厚，岡本修，鈴木高二朗，森川嘉之，有川太郎，岩波光保，水谷崇亮，小濱英司，山路徹，熊谷兼太郎，辰巳大介，鷺崎誠，泉山拓也，関克己，廉慶善，竹信正寛，加島寛章，伴野雅之，福永勇介，作中淳一郎，渡邊祐二：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港空研資料，No.1231.201