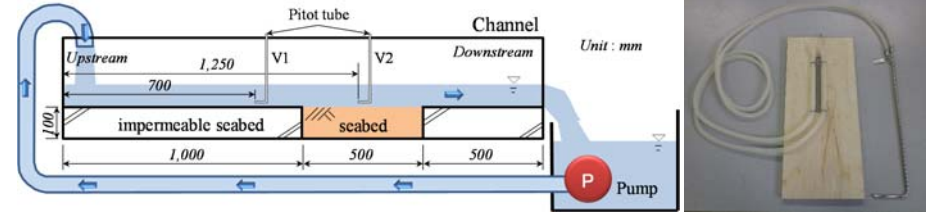


自由表面流れによる洗掘 掃流力・透水力(過剰間隙水圧)に関する考察

今瀬達也他(2012):土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1_836-1_840.
松田達也他(2016):土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No.2. (掲載決定)

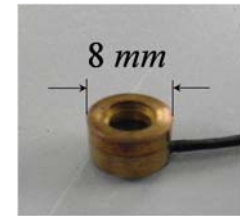
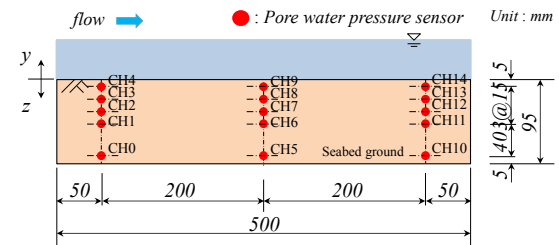
実験概要—装置および計測機器—

実験装置の概要



ピトー管

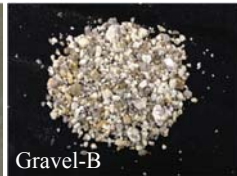
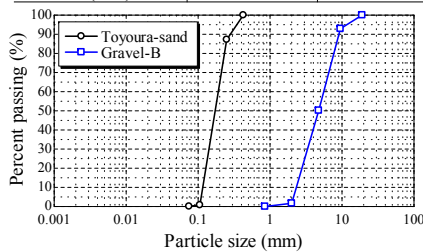
地盤内間隙水圧計の設置箇所



小型間隙水圧計

実験概要—実験条件— 実験試料

Geo material	Toyoura sand	Gravel-B
D_{10} (mm)	0.116	2.319
D_{50} (mm)	0.173	4.733
Permeability k (m/s)	2.210×10^{-4}	5.378×10^{-2}



実験ケース

Case	Seabed soil material	Degree of saturation S_r [%]	Relative density D_r [%]
Case1-1-1	Toyoura sand	100	40
Case1-1-2	Toyoura sand	100	40
Case1-2	Toyoura sand	100	70
Case1-3	Toyoura sand	17.7	60
Case1-4-1	Toyoura sand	0	60
Case1-4-2	Toyoura sand	0	60
Case1-5	Gravel-B	100	-

実験条件

Pump performance (ℓ/min)	Q	120
Average flow velocity (m/s)	v	0.35
Reynolds number	R_e	10788 (Laminar flow)
Froude number	F_r	0.56

実験結果—掃流力:限界流速—

無次元掃流力 τ^* の算出(実験条件)

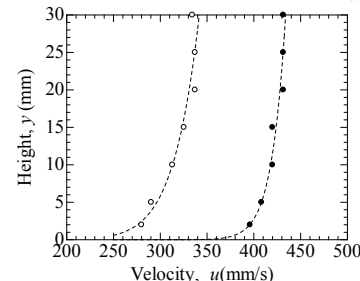
Prandtl-Karmanの対数分布則

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k}$$

κ : カルマン定数($\kappa=0.4$)
 k : 比例定数($k=0.2$)
 A_r : 実験係数($A_r=8.5$)

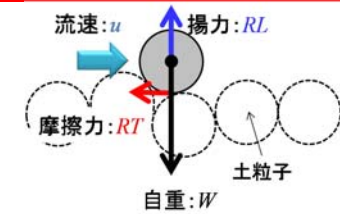
$$\tau^* = \frac{u_*^2}{sgd}$$

s : 砂の水中比重($s=1.65$)
 g : 重力加速度
 d : 砂の粒径(中央粒径 D_{50})



● V1: On the impermeable bed
○ V2: On the permeable bed

流速鉛直分布



無次元限界掃流力 τ_c^* の算出(岩垣式)

$$\begin{aligned} d \geq 0.303\text{cm}: & u_c^* = 80.9d \\ 0.118 \leq d < 0.303\text{cm}: & u_c^* = 134.6d^{3/22} \\ 0.0565 \leq d < 0.118\text{cm}: & u_c^* = 55.0d \\ 0.0065 \leq d < 0.0565\text{cm}: & u_c^* = 8.41d^{11/32} \\ d < 0.0065\text{cm}: & u_c^* = 226d \end{aligned}$$

Toyoura-sand ($D_{50}=0.17\text{mm}$)

$$0.0065 \leq d < 0.0565\text{cm}: u_c^* = 8.41d^{11/32}$$

$$\tau^* = 1.03 > \tau_c^* = 0.30$$

Gravel-B ($D_{50}=4.7\text{mm}$)

$$0.118 \leq d < 0.303\text{cm}: u_c^* = 134.6d^{3/22}$$

$$\tau^* = 0.02025 < \tau_c^* = 0.05$$

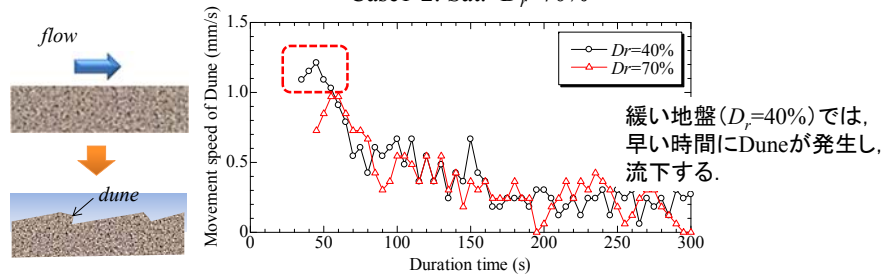
実験結果 - 洗掘の進行 -



Case 1-1: Sat. $D_r = 40\%$



Case 1-2: Sat. $D_r = 70\%$

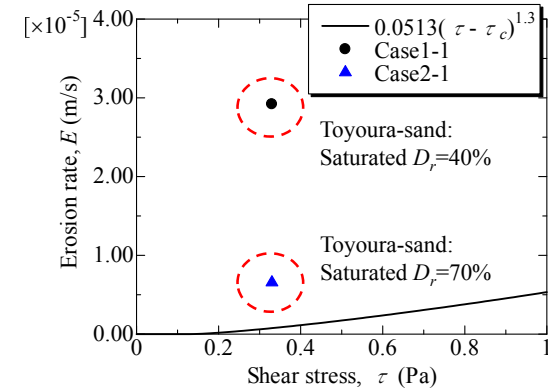


Duneの流下移動速度

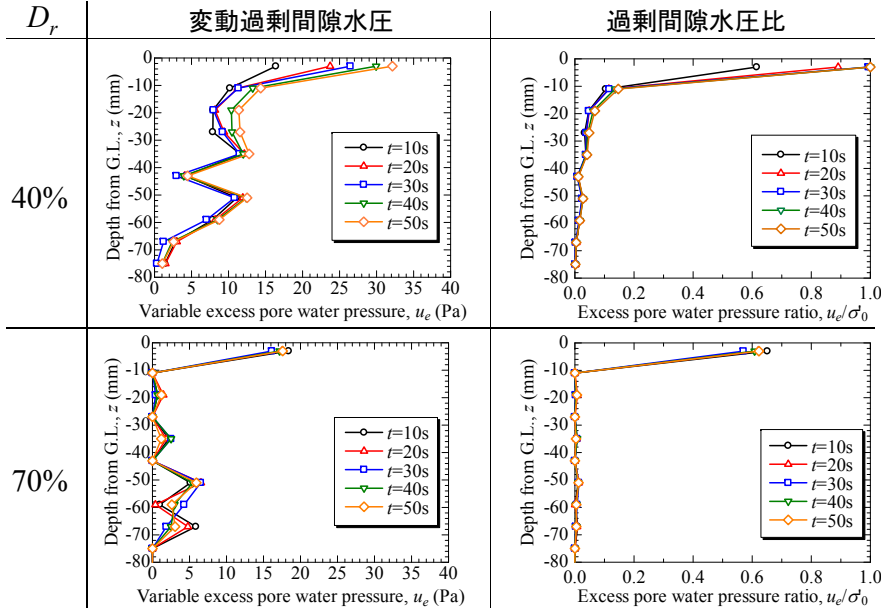
実験結果 - 洗掘・浸食速度 -

$$E = 0.0513(\tau - \tau_c)^{1.3} \quad \text{Wang and Bowles (2006): Advances in Water Resources}$$

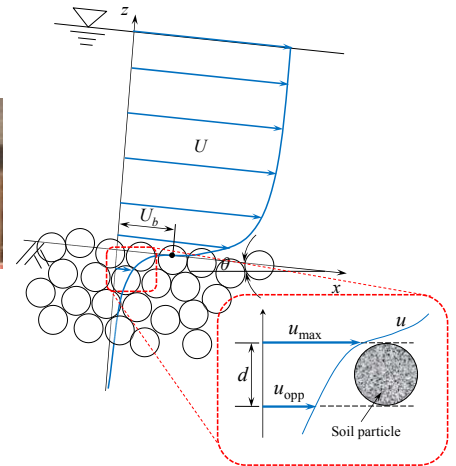
Wang and Bowlesは非粘着性の砂質土および礫材の堤体侵食を対象として推定式を提案している。



実験結果 - 変動過剰間隙水圧・過剰間隙水圧比 -



開水路流れによる地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察



地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

開水路流れの流速分布

Reynolds平均をとった2次元Navier-Stokes方程式

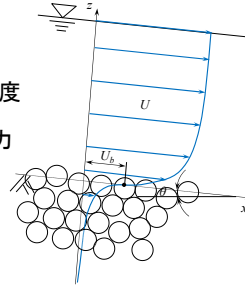
$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad U_i: \text{流速ベクトル} \quad \rho: \text{水の密度}$$

T_{ij} : 応力テンソル F_i : 体積力

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0$$

P : 圧力 ν_T : 渦動粘性係

$$T_{ij} = -P\delta_{ij} + \rho\nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$



底面位置の補正量 z_0 を考慮した混合距離

問題点として

$$\nu_T = l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| = \left[\kappa(z+z_0) \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \right]^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|$$

開水路流れにおける自由表面の影響

浸透層上の混合距離の不明確

l : 混合距離, H : 水深

開水路流れの流速分布: 開水路流れを流下方向に等流状態と仮定

$$\frac{U}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z+z_0}{z_0} + \frac{U_b}{U_f} \quad \kappa: \text{カルマン定数}(\kappa=0.4)$$

U_b : スリップ流速 U_f : 摩擦速度

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

浸透流の流速分布

粒子径 d_s および透水性を表す長さスケール \sqrt{K} と浸透層上面における摩擦速度を用いて、二つのReynolds数が定義できる⁶⁾。

6) Nepf, H. and Ghisalverti, M.: *Acta Geophys.*, Vol. 56, pp.753-777, 2008.

Re_d は粗度高さ z_0 と粘性底層厚さ δ の比を表すReynolds数

底面の粗滑を決定する無次元量

$$Re_d = \frac{d_s U_f}{\nu}$$

Re_K は平均的な空隙の長さスケール \sqrt{K} と粘性底層厚さ δ の比を表すReynolds数

$$Re_K = \frac{\sqrt{K} U_f}{\nu}$$

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

浸透流の流速分布

体積平均・Reynolds平均をとった2次元Navier-Stokes方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) - \frac{n\nu}{K} u_i - \frac{n\nu F}{K} |u_i| u_i + F_i$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0$$

u_i : 浸透層内において体積平均をとった実質流速ベクトル

p : 間隙水圧

n : 間隙率

ν : 水の動粘性係数

$-\overline{u_i' u_j'}$ はReynolds応力テンソル

Darcyの抗力とForchheimerの抗力

$$K = \frac{d_s^2 n^3}{180(1-n)^2} \quad F = \frac{n}{100(1-n)} \frac{d_s}{\nu}$$

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

浸透流の流速分布

Re_k が比較的小さいとき

$$U = \left[\frac{U_b}{\varepsilon} - \left(\frac{Kg \sin \theta}{\varepsilon \nu} \right) \right] \cdot \exp \left[z \sqrt{\frac{\varepsilon}{K}} \right] + \frac{Kg \sin \theta}{\varepsilon \nu}$$

ε : 間隙率

ν : 動粘性係数

l : 混合距離 ($=kB$)

K : Darcyの抗力

F : Forchheimerの抗力

Brinkman方程式¹¹⁾

11) Brinkman, H. C.: *Appl Sci. Res.*, A1, 27-34, 1947.

Re_k が比較的大きいとき

$$U = \left[\frac{U_b}{\varepsilon} - \left(\frac{Kg \sin \theta}{\varepsilon \nu F} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \exp \left[\left(\frac{\varepsilon \nu F}{2k^2 B^2 K} \right)^{\frac{1}{3}} z \right] + \left(\frac{Kg \sin \theta}{\varepsilon \nu F} \right)^{\frac{1}{2}}$$

混合距離 ($l=kB$)について

浸透層内の空隙スケール B により規定されるという考えに則して決定^{5), 12)}

5) 山田正, 川端規之: 土木学会論文報告集, 第325号, pp.69-80, 1982.

12) Inoue, E.: *Journal of Meteorological Society Japan*, Vol.41, No.6, 1963.

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

開水路流れと浸透流の接続

Re_k が比較的小さいとき

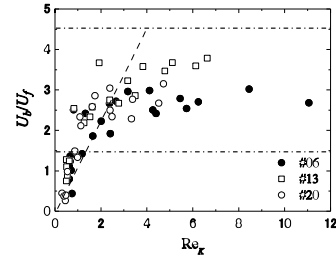
$$U_b = \left(\frac{1}{v} \sqrt{\frac{K}{n}} + \frac{K}{vH} \right) U_f^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{\sqrt{K}}{H} \right) Re_k U_f$$

\sqrt{K}/H は $1/\sqrt{\varepsilon}$ と比較すると十分小さいことから、以下のように近似

$$\frac{U_b}{U_f} = \frac{1}{\sqrt{n}} Re_k$$

Re_k が比較的大きいとき

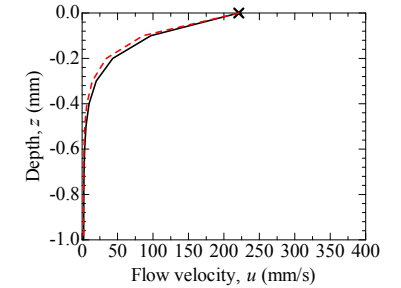
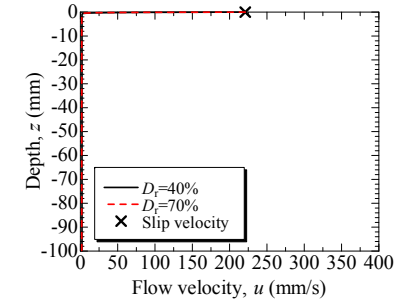
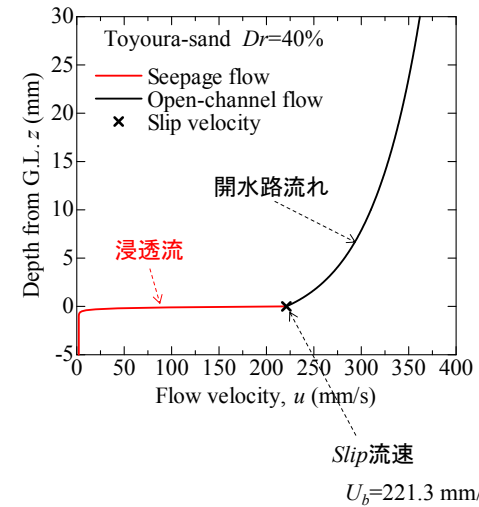
$$\frac{U_b}{U_f} = \left(\frac{1.1n^{5/2} d_s}{1-n} l \right)^{1/3}$$



13) Suga, K. et al: International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.31, pp.947-984, 2010.

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

開水路流れによる流速分布



地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

地盤内の過剰間隙水圧

Bernoulliのエネルギー保存則より

$$u_e = \rho c_L^* \frac{u_{\max}^2 - u_{opp}^2}{2}$$

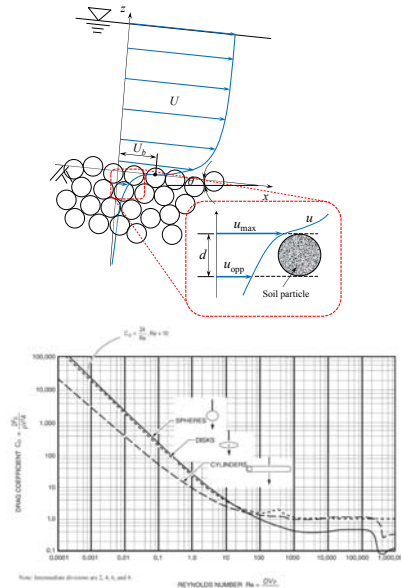
c_L^* : 揚力係数

$$c_L^* = 0.54 \cdot c_D$$

c_D : 抗力係数

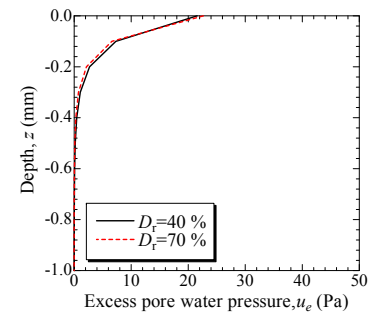
$$c_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.152 \sqrt{Re} + 0.0151 Re)$$

Re: 粒子レイノルズ数

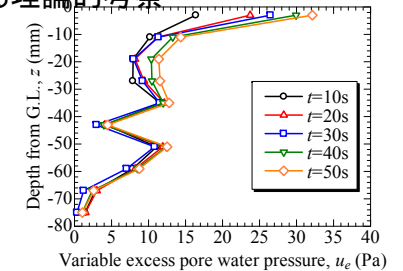


地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

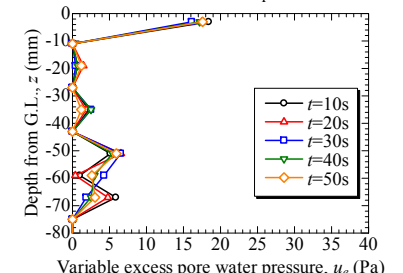
理論値と実験値の比較： 過剰間隙水圧分布



理論値



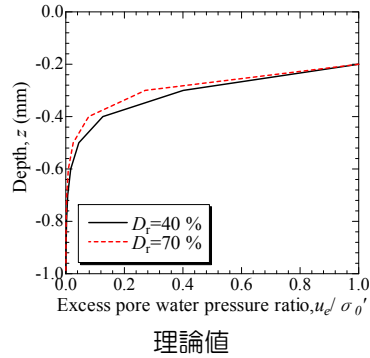
実験 (豊浦砂 $D_r=40\%$)



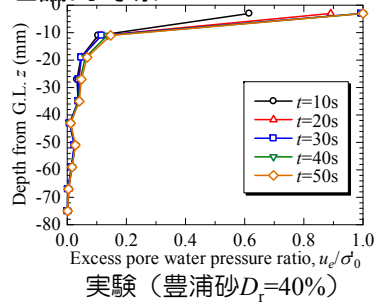
実験 (豊浦砂 $D_r=70\%$)

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

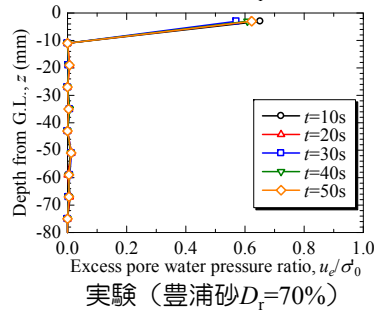
理論値と実験値の比較：
過剰間隙水圧比分布



理論値



実験 (豊浦砂 $D_r=40\%$)



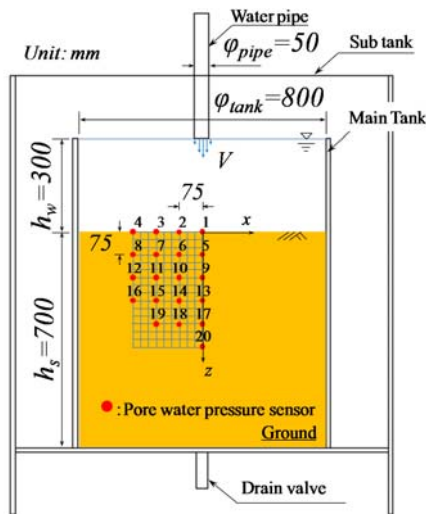
実験 (豊浦砂 $D_r=70\%$)

Jet流(鉛直噴流)による洗掘実験・解析

松田達也他(2014): 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1_1041-1_1045.

松田達也他(2016): 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No.2. (掲載決定)

実験概要



実験装置概要図

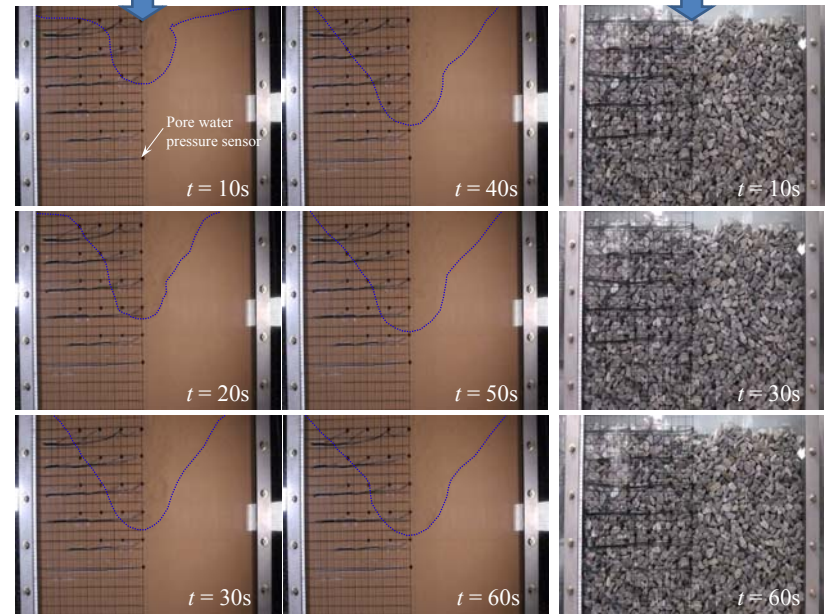
実験の諸言

堆積地盤高 h_s	700 (mm)
ジェット管と地盤表面間のクリアランス h_w :一定	300 (mm)
ジェット管直径	50 (mm)
流入速度 V	2.0 (m/s)
流入量 Q :ポンプ規格	120 (L/min)
地盤底面の排水条件	非排水

地盤材料



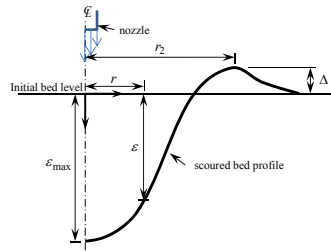
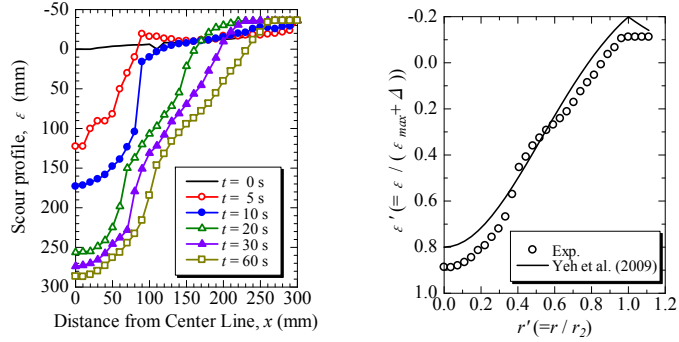
	豊浦砂 ($D_r=40\%$)	礫(碎石)
平均粒径 D_{50} (mm)	0.17	25
透水係数 k (m/s)	2.210×10^{-4}	8.349



豊浦砂 ($D_r=40\%$)

碎石(礫)

実験結果: 洗掘形状-既往の実験結果(Yeh et al.)との比較-

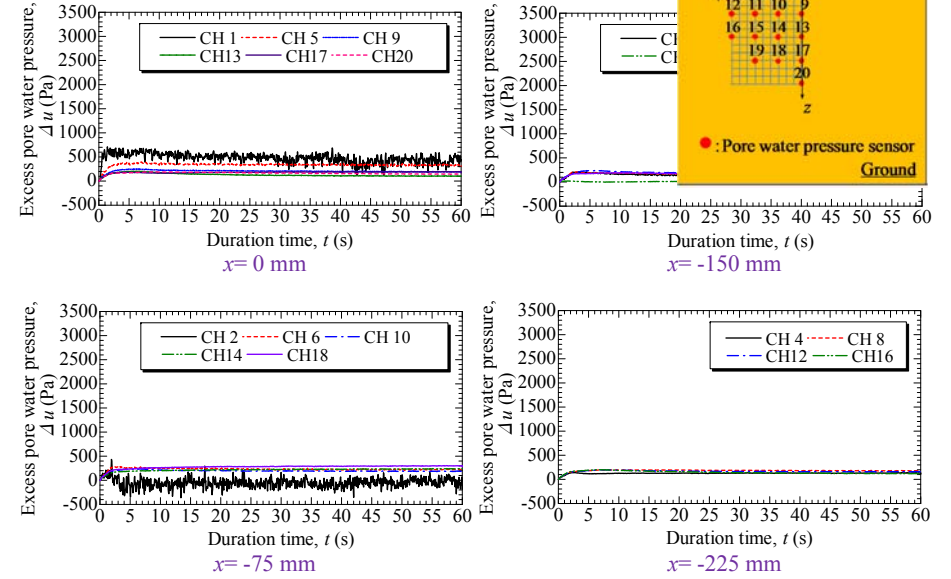


Yeh, P.-H et al. (2009): Ocean Eng., 36, pp. 248-255.

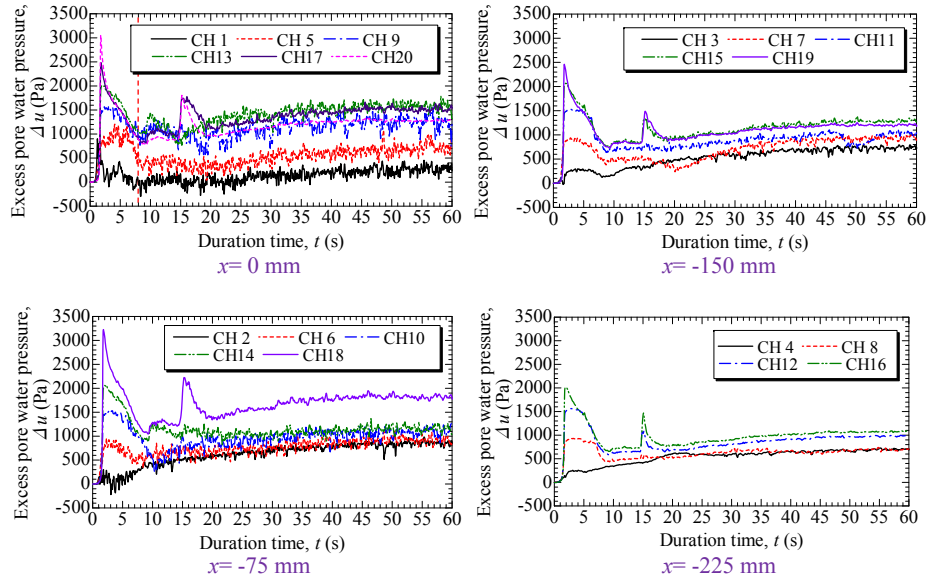
$$\epsilon' = -1.2 \exp\left[-0.5\left(\frac{r'}{0.528}\right)^2\right] + 0.4 \quad \text{for } -1 \leq r' \leq 1$$

$$\epsilon' = 0.88 \exp\left[-0.5\left(\frac{r'}{0.580}\right)^2\right] \quad \text{for } r' > 1 \text{ and } r' < -1$$

実験結果: 過剰間隙水圧の変化-礫材-

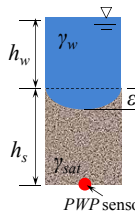
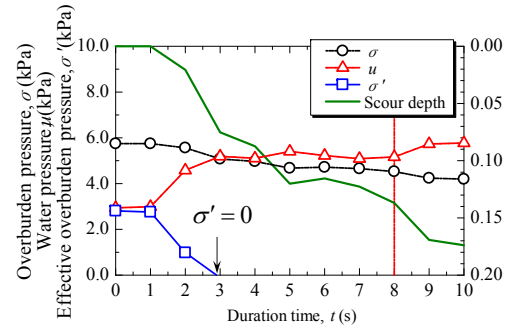


実験結果: 過剰間隙水圧の変化-豊浦砂 (Dr=40%)



実験結果: 過剰間隙水圧の変化-豊浦砂 (Dr=40%)

全応力・有効応力・間隙水圧の経時変化



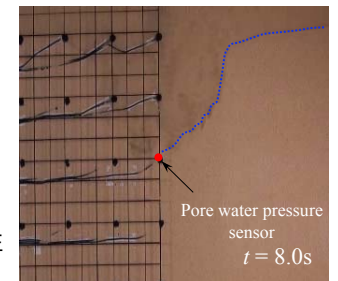
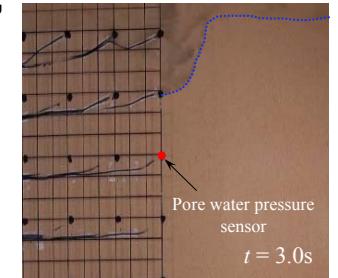
全応力 $\sigma = \gamma_w (h_w - \epsilon) + \gamma_{sat} h_s$

有効応力 $\sigma' = \sigma - u$

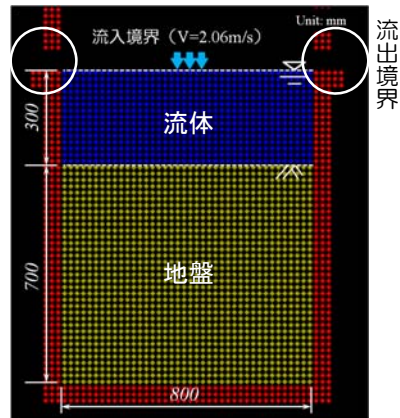
間隙水圧 $u = u_s \Delta u$

u_s : 海底地盤表層での変動水圧

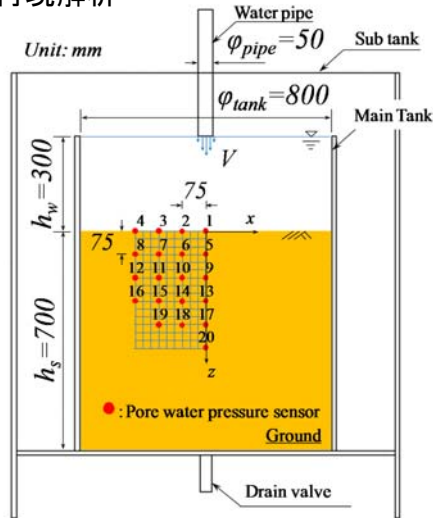
過剰間隙水圧 $\Delta u = u_e$



数値シミュレーションによる実験再現解析



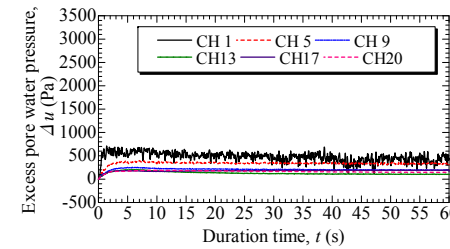
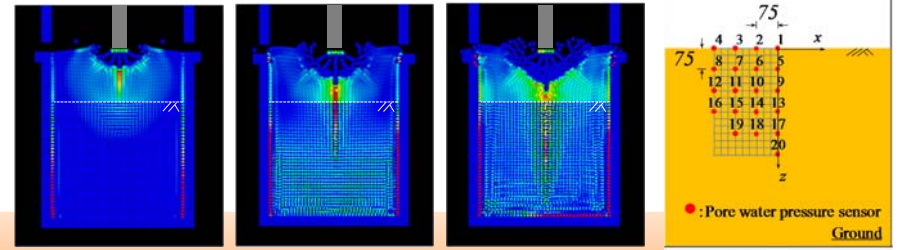
解析モデル(初期条件)



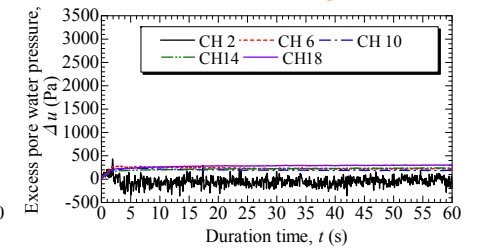
実験モデル(初期条件)

解析結果：過剰間隙水圧分布

礫 ($k=1.0 \times 10^{-2}$ m/s)



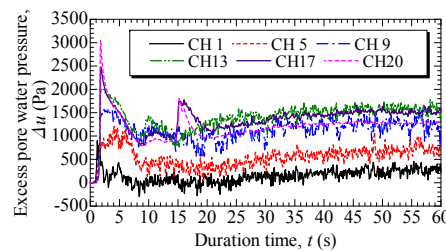
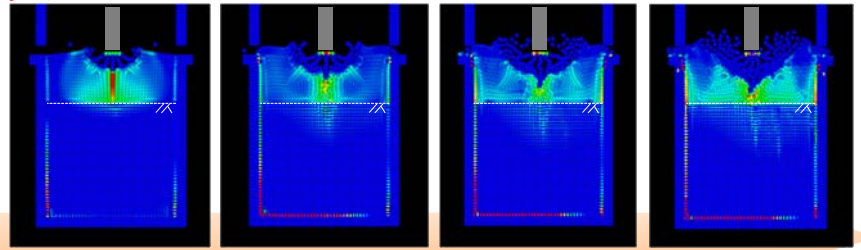
$x = 0$ mm



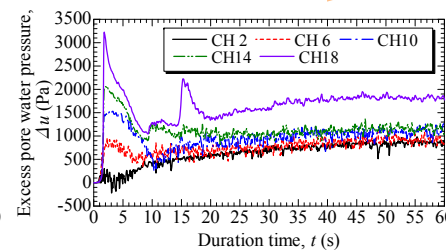
$x = -75$ mm

解析結果：過剰間隙水圧分布

砂質土 ($k=1.0 \times 10^{-5}$ m/s)



$x = 0$ mm



$x = -75$ mm

結言

移動床実験により

- 地盤面に開水路流れが作用することで、地盤条件に応じて地盤内部に過剰間隙水圧が発生することを明らかにすることができた。
- 地盤の透水性を考慮した流速鉛直分布から地盤内部の間隙水圧変動を考察することにより、開水路流れによって発生する浸透流の作用で地盤極表層において過剰間隙水圧が発生することを明らかとし、実験値を定量的に評価することができた。

ジェット流による洗掘実験より

- 地盤材料により地盤内部の水圧変化に違いがみられた。特に、豊浦砂の場合では地盤内部に過剰間隙水圧地盤が発生することがわかった。
- 数値解析において、多孔質剛体地盤を用いて実験の再現解析をしたが、地盤内部に水圧上昇を確認したが、定量的な評価には至らなかった。

今後の検討項目として

- 流れの乱流による圧力変動の影響
- 圧力伝播の影響の水理学的な要因
- 低拘束圧条件における地盤の変形問題等の固体力学的な要因