

座 長 水谷 法美 名古屋大学

話題提供者 鈴木 高二朗 港湾空港技術研究所

鈴木 崇之 横浜国立大学

飛田 哲男 関西大学

松田 達也 豊橋技術科学大学

日 時 平成 28 年 9 月 9 日 (金) 13:00~15:00

場 所 東北大学川内北キャンパス

教 室 A棟A401

海岸工学委員会

実験における地盤材料の評価 一水理学的アプローチと地盤工学的アプローチー

海岸工学委員会

水理模型実験における地盤材料の取り扱い方法に関する研究小委員会

平成 28 年 9 月 9 日(金) 13:00-15:00 A 棟 A401

開催主旨

水理模型実験の縮尺設定に際してフルード相似則を用いることが多い. しかし地盤材料を扱う場合, その幾何縮尺を厳密に適用することは難しい. そこで水理学分野では,同質かつ小さな材料が一般的に用いられてきた. 一方, 地盤工学分野で従来から活用されてきた遠心載荷装置を用いた水理模型実験手法が開発され, 学会でも数々の適用事例が報告されている. しかし従来の水理学分野では16場を前提とするのに対し, 遠心載荷装置では遠心力場に応じた相似則を用いることから, 水理学分野と地盤工学分野において相似則を含めた実験の整合性および結果の取り扱いに対する共通認識を得るには至っていない. そこで両分野の研究者にお集まり頂いて討議を行う.

座 長

名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 水谷 法美 氏(海岸工学,海洋工学)

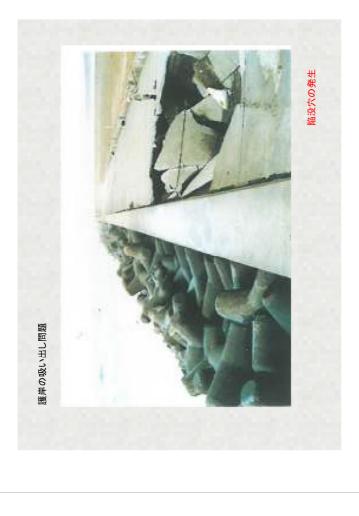
話題提供者(50音順)

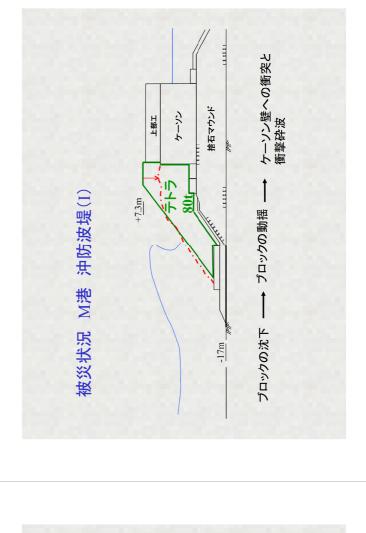
港湾空港技術研究所 海洋研究領域 耐波研究チーム グループ長 鈴木 高二朗 氏(海岸工学,耐波工学) 『消波ブロック被覆堤ブロック下部の洗掘量の推定について』

横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 都市イノベーション部門 准教授 鈴木 崇之 氏(海岸工学,沿岸環境工学) 『砂浜海岸における現地調査,および室内実験における底質移動実験』

関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 准教授 飛田 哲男 氏(地盤地震工学) 『地盤模型実験と相似則』

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 都市・地域マネジメント学分野 講師 松田 達也 氏(地盤工学,応用力学) 『土粒子・要素に着目した水際における地盤挙動の考察」





H.8 7/25ブロック設置直後

M港 沖防波堤(I)

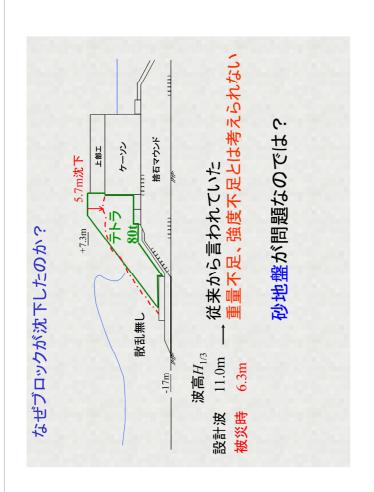
現地被災事例

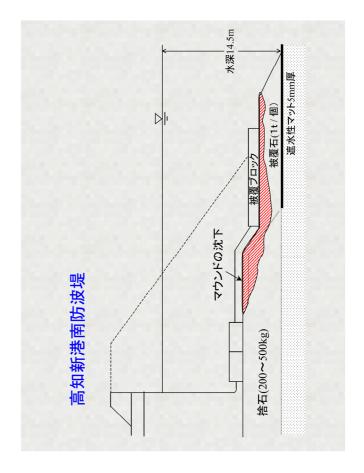
H.8 8/14台風12号通過後

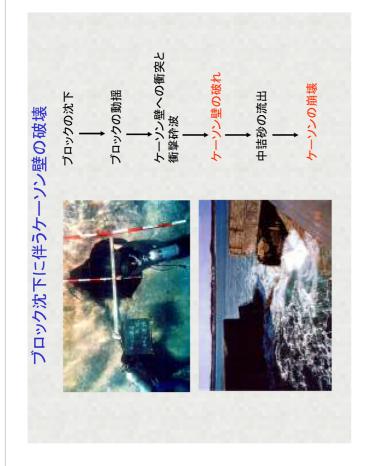
重量は設計公式・実験で適切に決定されている

しかし、全国各地で被災





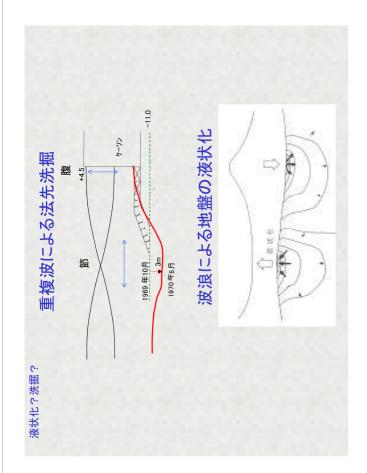




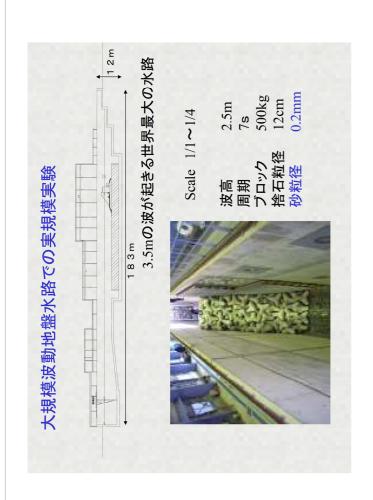




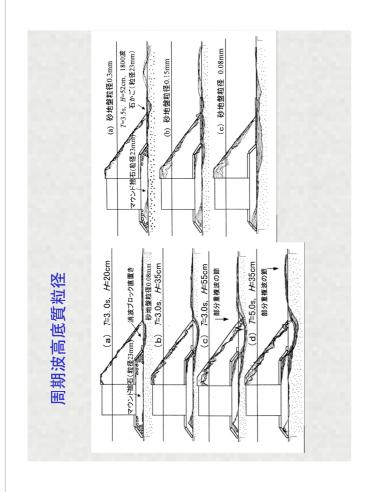


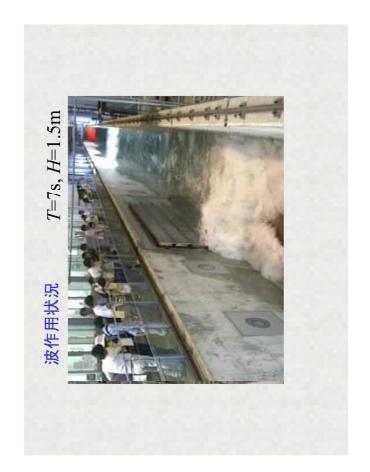


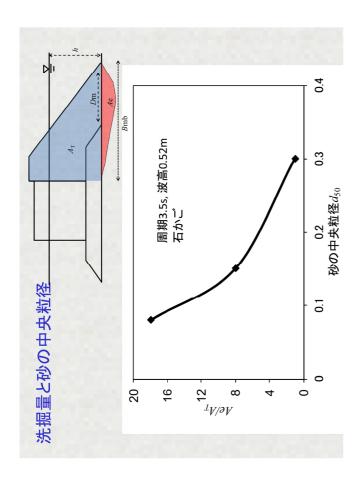


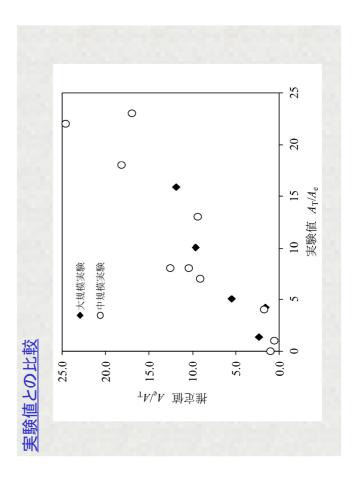


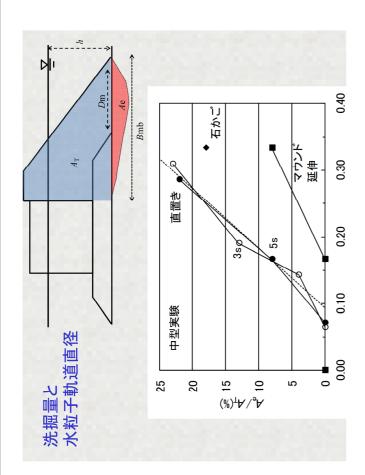


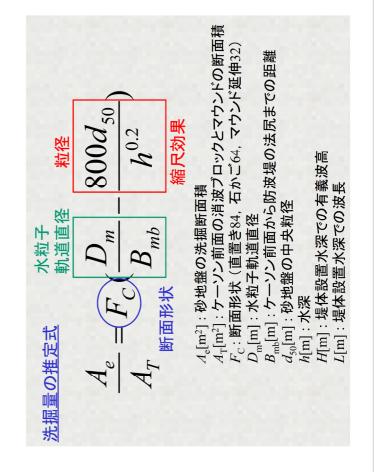


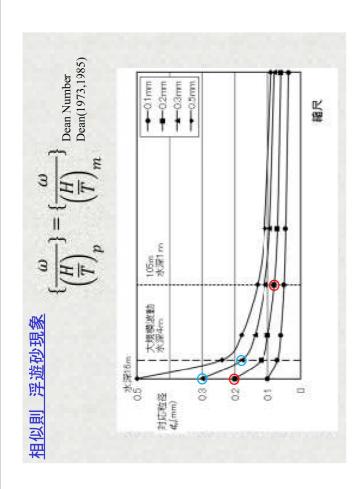




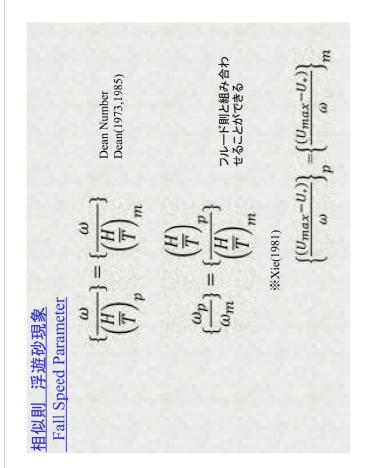




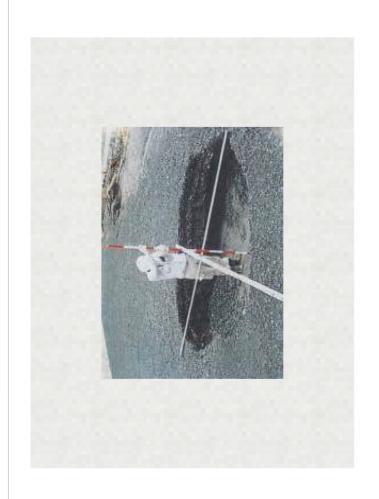


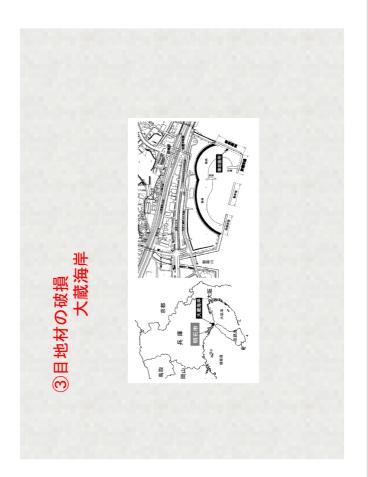


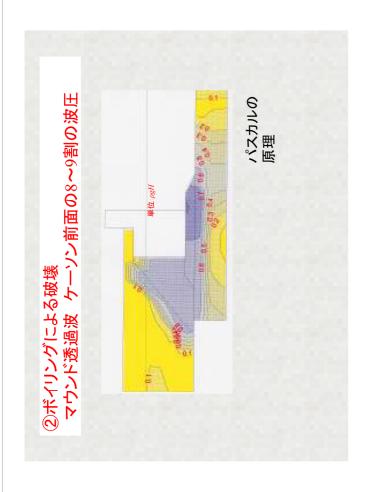


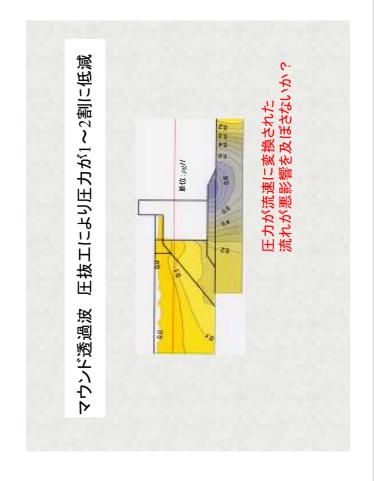


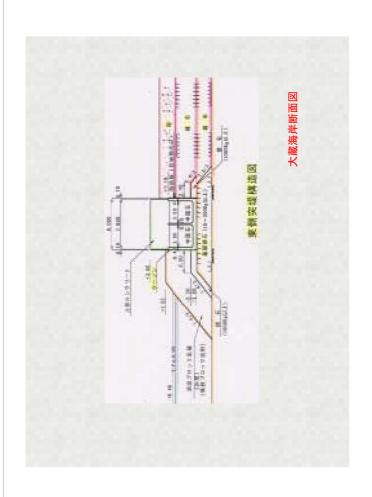


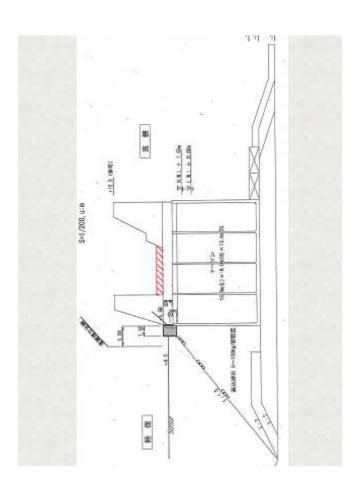






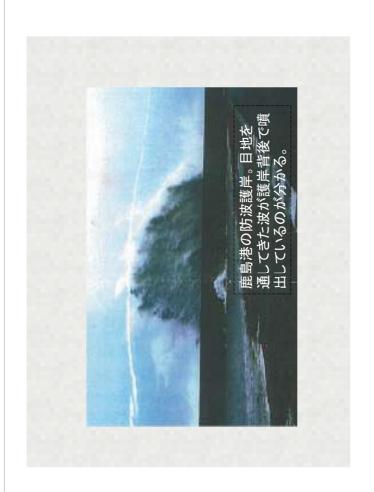


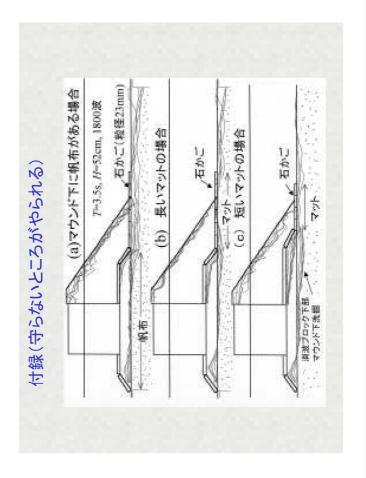


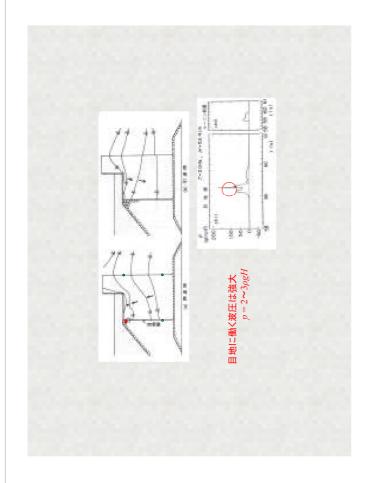


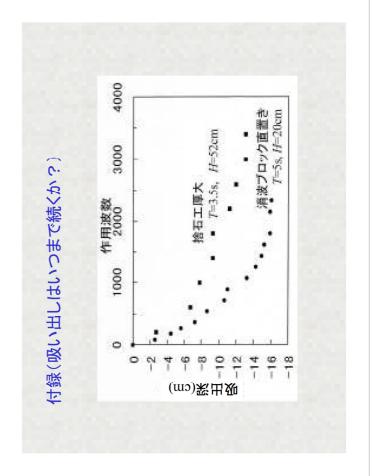


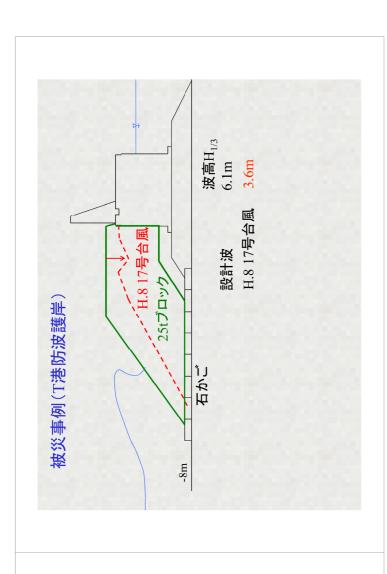


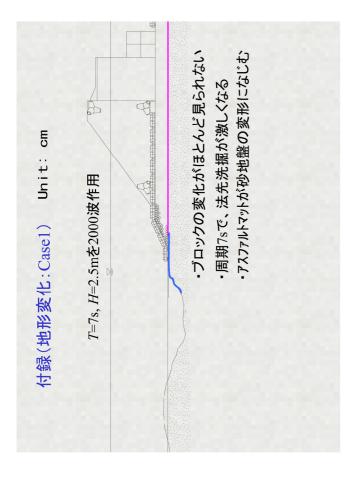












砂浜海岸における現地調査, および 室内実験における底質移動実験





横浜国立大学 鈴木崇之

波崎海岸における現地調査研究

◇目的

強光砂 の投入とコア採取により、高波浪イベント時における底質の岸沖、および鉛直方向移動動態を明らかにする 遡上域から砕波帯内外にかけての一帯を研究対象領域とし、

研究対象地域

◇波崎海洋研究施設(HORS)

- 茨城県波崎海岸に位置
- 独法港湾空港技術研究所所有
 - 長さ427mの観測桟橋を保有
 - 中央粒径0.18mm

◇取得データ

- 周期) 地形断面波浪(波高)

Google map

HORSの位置

現地・室内での波浪条件の違い

◇ 現地海岸(茨城県波崎海岸) •波高 H<2.5 m

•周期 T<15s

◇室内実験

H < 15 cm T < 5 s 底質は共に約0.18mmの維砂



海光砂, コアサンプリング

◇知光砂

- 中央粒径0.18mm(波崎海岸の中央粒径と同様)
 - 桃,黄,青,緑,赤の5色
- ブラックライトを照射することで蛍光





ブラックライト照射前





ブラックライト照射後

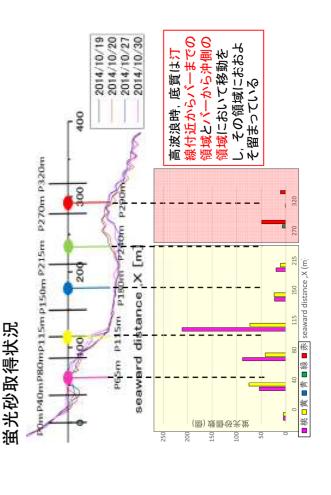


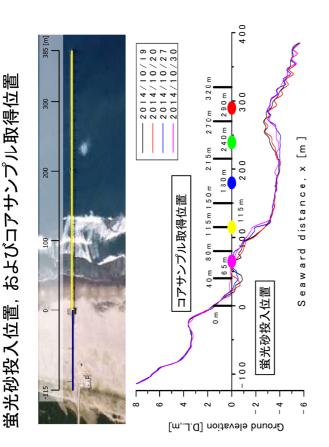
長さ1.3m, 内径5.2cm, 外径6.0cm のクリア塩ビパイプ

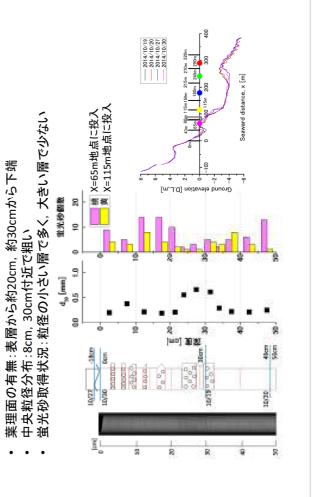
 \Diamond

銚子港

- 有義波高 (m) 有義波周期 (s) 平均沖波
エネルギーフラシクス (N/s) 30日コア取得 2014/10/30 日介 高波浪 2014/10/23 観測時の波浪状況 蛍光砂投入 19日 X = 303 m2014/10/16 2.5 -2.0 3.0 0.5 0.0 スクで小し、 (s/N) 8





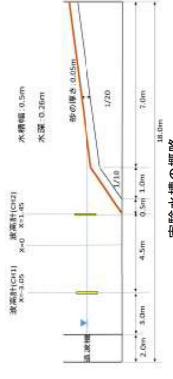


(岸沖方向位置 x=80 m)

コア解析結果

蛍光砂を用いた室内実験

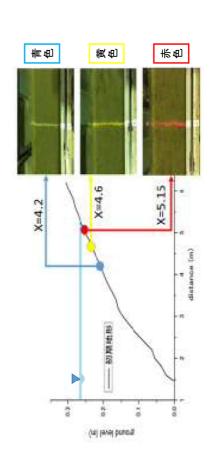
- ◆断面二次元水槽において<mark>蛍光砂投入し,堆積性・侵食性波</mark> 浪を造波する移動床実験を行った.
- ◆一定時間ごとにコアサンプルの取得を行い、蛍光砂の取得 状況から岸沖・鉛直方向の底質移動を考察する.



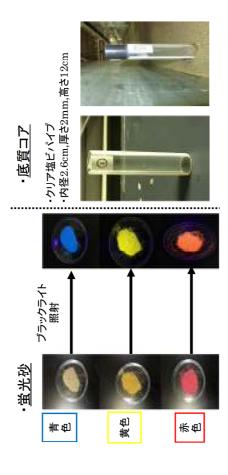
実験水槽の概略

蛍光砂投入位置

◆各色6gずつ投入



底質動態の把握

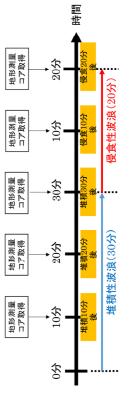


実験手順

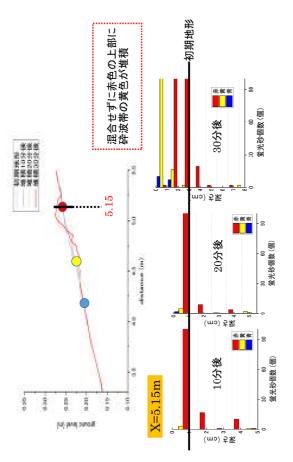
·造波条件

事際の推議→信食の海浜	く感じられて、ススングが、	
周期(s)	2.0	8.0
波高(cm)	1.8	2.8
タイプ	堆積性波浪	侵食性波浪

実験の流れ



堆積時における岸沖・鉛直方向の底質移動



許 新

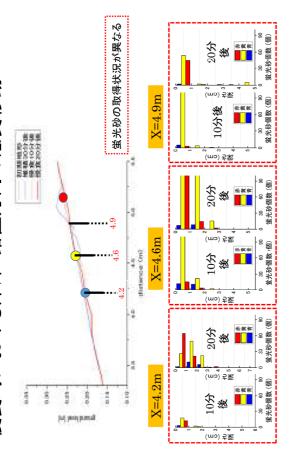
(現地調査)

- 蛍光砂の投入とコアの取得により、地形の堆積履歴を把握.
- ・ 地形断面計測, コアのX線CTスキャン画像により, 同じ堆積に おいても葉理面の有無が確認された.
 - 高波浪時,底質は汀線付近からバーまでの領域とバーから沖側の領域において移動をし,その領域におおよそ留まっていることが分かった.

[室内実験]

- 堆積性波浪の作用下では、バームを形成する漂砂の多くは 砕波帯から移動し、徐々に堆積していた
- 侵食性波浪の作用下では、地形変化に顕著でなくても動的 平衡を保ちながらも鉛直混合していることが分かった

侵食時における岸沖・鉛直方向の底質移動



地盤模型実験と相似則

関西大学

環境都市工学部 都市システム工学科

飛田哲男

支配方程式による相似則の導出

例)弾性体の基礎方程式

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = \rho \ddot{u}_i \qquad \cdots \oplus \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \qquad \cdots \oplus$$

変位一ひずみ関係

構成式

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \mathcal{E}_{kl}$$
 ... (3)

◆ 実物と模型の物理量に下記の比例関係が成立つとする.

$$(x_i)_p = \lambda(x_i)_m, (\sigma_{ij})_p = \lambda_{\sigma}(\sigma_i)_m, (u_i)_p = \lambda_u(u_i)_m, (C_{ikl})_p = \lambda_C(C_{ikl})_m$$

$$(\rho_i)_p = \lambda_{\rho}(\rho_i)_m, (g_i)_p = \lambda_g(g_i)_m, (g_i)_p = \lambda_\varepsilon(g_i)_m, (t_i)_p = \lambda_t(t_i)_m$$

₺くじ

・支配方程式による地盤模型実験の相似則の導出

•1G場の相似則

• 遠心場の相似則

• 拡張型相似則

・ 拡張型相似則の適用例:液状化と「津波」の影響を受ける杭

基礎を有する建物の挙動

式①が実物の物理量を対象としたものであるとすれば、

$$\frac{\partial(\sigma_{ij})_p}{\partial(x_j)_p} + (X_i)_p = (\rho_i)_p \frac{\partial^2(u_{ij})_p}{\partial(t_i)_p^2} \cdots \oplus$$

各物理量の比例関係を代入すると,

$$\frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda} \frac{\partial (\sigma_{ij})_m}{\partial (x_j)_m} + \lambda_{\rho} \lambda_g (X_i)_m = \lambda_{\rho} \frac{\lambda_u}{\lambda_i^2} (\rho)_m \frac{\partial^2 (u_{ij})_m}{\partial (t_j)_m} \qquad \cdots \text{ (§)}$$

力のつり合い式は模型の物理量に対しても成り立つので、

$$\frac{\partial(\sigma_{i})_{m}}{\partial(x_{j})_{m}} + (X_{i})_{m} = (\rho_{i})_{m} \frac{\partial^{2}(u_{ij})_{m}}{\partial(t_{i})_{m}} \cdots (\widehat{\mathbb{G}})$$

したがって、式⑤, ⑥の係数を比較することにより,

$$rac{\lambda_{\sigma}}{\lambda} = \lambda_{
ho} \lambda_{
m g} = \lambda_{
ho} rac{\lambda_{
m u}}{\lambda_{
m v}^2} \qquad \cdots ... ($$

ここで式⑦の左の等式により、応力の相似則は、

$$\lambda_{\sigma} = \lambda \lambda_{\rho} \lambda_{g}$$
 ...

同様に,式②,③より,時間,変位,剛性に関する相似則は以下のように与えられる.

$$\lambda_{l} = \left(\frac{\lambda \lambda_{\varepsilon}}{\lambda_{g}} \right)^{0.5}$$
 $\lambda_{u} = \lambda \lambda_{\varepsilon}$
 $\lambda_{c} = \frac{\lambda \lambda_{\rho} \lambda_{g}}{\lambda_{\varepsilon}}$

$$\begin{pmatrix} \lambda_g \end{pmatrix}$$

e

遠心場模型実験に関する相似則

長さ
$$\lambda = \eta$$
 加速度 $\lambda_g = 1/\eta$ 密度 $\lambda_\rho = 1$ 回性 $\lambda_c = \left(\frac{\lambda \lambda_g}{\lambda_g}\right)^{0.5} = \eta$ 密度 $\lambda_\rho = 1$ のずみ $\lambda_c = 1$

半径方向に遠心加速度が異なるため,模型地盤に作用する重力(遠心力)が深さごとに 異なる. このため, 水面や液状化後の地表面が装置の回転面に沿って円弧を描く. ラ 半径の大きな装置を使う. 土槽長手方向を回転面に対し垂直に置く

1G場模型実験に関する相似則 (lai 1989)

- 長さと変位の相似係数が異なる→縮尺が大きくなるほど両者はかい離
- 寸法効果:通常, 土粒子は縮尺に合わせて小さくしないので, 粒径と構造物模型の 相対的な大きさによっては、変形モードが実際と異なる可能性がある。 >Modelling of modelsにより確認する

粘性流体を用いる理由(Viscous scaling)

過剰間隙水圧の消散過程は圧密現象に支配される すれば, 圧密係数c_vが等しい(2). ここで, k透水係数, ho間隙流体の密度,g重力加速度, m_v 体積弾性係数 、地盤内浸透問題)、実物と模型とで同じ土を使うと 遠心場における時間4の相似則(1)

かし、この場合、時間は1/№の相似則に従うことに で時間係数 7, ポ等しいことから導かれる. し また、消散時間に関する相似則は、実物と模型と

体が用いられる. 動粘性係数 ਖ=μ/ρ)をΜ倍することに この矛盾を解決するため、地盤模型実験では粘性流 より(透水係数を1/Nとし(4)), 圧密係数kの相似則を 1/Nとすることで(5), 時間の相似則を一致させる(6).

$$t_{m} = \frac{t_{p}}{N} \qquad (1)$$

$$c_{v,m} = c_{v,p} \left(= \frac{k}{Ogm} \right) \qquad (2)$$

$$t_m = \frac{d_m^2}{c_{v,m}} = \frac{\left(d_p / N\right)^2}{c_{v,p}} = \frac{t_p}{N^2}$$
 (3)

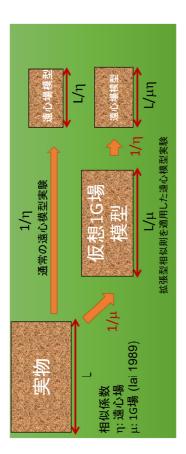
$$k = \frac{K\rho g}{MH} = \frac{Kg}{NV} \tag{4}$$

$$C_{v,m} = \frac{C_{v,p}}{N} \tag{5}$$

$$m = \frac{d^2}{d^m} = \frac{\left(d_p / N\right)^2}{C / N} = \frac{t_p}{N}$$
 (6)

拡張型相似則 (lai et al. 2005)

拡張型相似則を適用した模型実験とは, 遠心場で行う1G場の模型実験である.



拡張型相似則

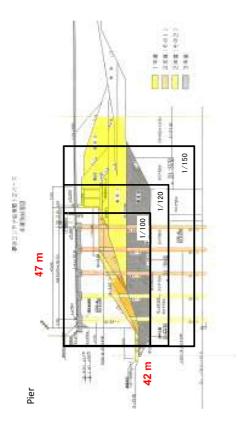
(Iai et al. 2005)

	(1) Scaling factors for 1g test	(2) Scaling factors for centrifuge test	(3) Generalized scaling factors
Length	п	lı	lи
Density	1	s i	1
Time	μ ^{0.75}	Ĺ	μ ^{0.75} η
Frequency	μ-0.75	1/n	ր _{-0.75} /η
Acceleration	1	1/n	1/n
Velocity	μ ^{0.75}	v I	μ ^{0.75}
Displacement	μ ^{1.5}	lı	μ ^{1.5} η
Stress	ı	v I	1
Strain	μ ^{0.5}	v I	h ^{0.5}
Stiffness	μ ^{0.5}	v I	h ^{0.5}
Permeability	μ ^{0.75}	lı	μ ^{0.75} η
Pore pressure	ц	s I	п
Fluid Pressure	1	v I	ュ

Is physical modeling possible for large prototypes?

土槽サイズに制限あり: 45 W×30H×15D (cm)

大縮尺 = 精度低い+装置の容量にも限度あり



拡張型相似**則に関する既往の研究**(Modelling of modelsによる相似則の検証)

- 飛田哲男, 井舎進, 大内俊介. [2015]. "津<mark>波と液状化の</mark>複合作用による<mark>杭基礎を有する建築物の転倒メカニズ</mark>ム." 自然災害科学, 34(1), 23-39.
- Tobita, T. and Iai, S. (2015) New modeling of models for dynamic behavior of a pile foundation. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15ARC), Fukuoka, Japan http://doi.org/10.3208/jgssp.JPN-026.
- Tobita, T., Escoffier, S., Chazelas, J. L., and Iai, S. (2014). "Verification of the generalized scaling law for flat layered sand deposit." Geotechnical Engineering Journal of the South Asian Geotechnical Society, 45(3), 32-39.
 - Tobita, T. (2014). "Combined effect of earthquake and tsunami on failure of a pile supported building." Geotechnics for Catastrophic Flooding Events Iai (Ed), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02709-1, 451-458.
- 飛田哲男,并合進 (2014) "津波による<mark>湾口防波堤の被災メカニズム、" Kansai Geo-Symposium 2014—地下水</mark>地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム—、107-112.
 - Tobita, T., Iai, S., von der Tann, L. and Yaoi, Y. (2011). "Application of the generalised scaling law to saturated ground." International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 11(4), 138-155.
- Tann, L. v. d., Tobita, T., and Iai, S. (2010). "Applicability of two stage scaling in dynamic centrifuge tests on saturated sand deposits." 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2019), Springman, Laue & Seward (Eds), 191-196.
- Tobita, T., Iai, S., and Noda, S. (2009). 'Study on generalized scaling law in centrifuge modeling with flat kyered media." Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ICSMGE), M. Hamza et al. (Eds.), Alexandria, Egypt, 664-667.
- lai, S., Tobita, T., and Nakahara, T. (2005). "Generalized scaling relations for dynamic centrifuge tests." Géotechnique, 55(5), 355-362.

杭基礎を有する建物の津波と液状化による 倒壊メカニズム

(飛田他, 自然災害科学, 2015)



宫城県女川町



- リート (RC造) の建物が津波により倒壊 女川町では, 杭基礎を持つ鉄骨造(S造)
- 液状化と津波の<mark>複合的な要因で,建物が倒壊する危険性が</mark> あることが実験的に示す.
- 拡張型相似則を適用し, 1/200縮尺の模型について20Gの 遠心場で実験
- 地盤については, 間隙水圧の消散時間を実物に合わせるた め水の粘性の113倍の粘性流体で飽和(Viscous scaling)
- 津波は上水でダムブレーク方式で与える

倒壊した杭基礎を有する鉄骨造建物 宮城県女川町



土木学会東日本大震災被害調査団 緊急地震被害調査報告書 より引用

倒壊した杭基礎を有する鉄骨造建物 宮城県女川町



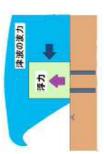
江島共済会館 土木学会東日本大震災被害調査団 緊急地震被害調查報告書

本研究の目的

杭基礎を持つS造, RC造建物が倒壊した可能性

液状化と津波の複合作用

遠心模型実験により、被災原因を調べる.



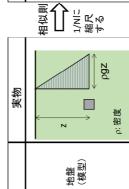


地盤液状化+津波

津波のみ







pg(z/N)

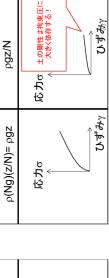
pgz

1G場模型

遠心場模型

16	z6d	र्रिके क्रिकेट्ट
作用する 重力/遠心 加速度	深さzの上載圧 (拘束圧)	応力ひずみ 関係

N G (N>1	zgq = (N/z)(gN)q	応力 _で (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
16	bgz	\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \



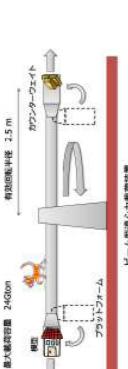
ひず*み*ッ

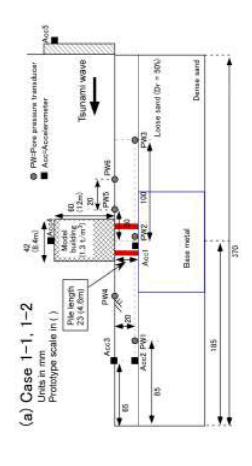
ガーム駐場のお機能機能 販売:数型を成が削削: 攻縮の大型たが凹着 油削: 機関サイズが踏られる

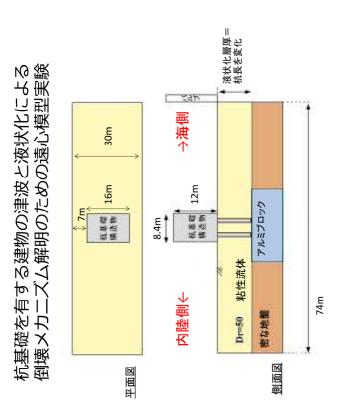
遠心力載荷装置

- ▶ 地盤・構造物系の挙動を正確に把握するための模型実験に使用する装置
- ▶ 相似則により<u>拘束圧依存性</u>を示す土の<mark>応力ーひずみ関係</mark>を忠実に再現
- 大規模な土木・建築構造物の挙動を縮小モデルで再現

防災研究所の違い力裁結被置 (2号機2010年から)









杭基礎構造物模型について





杭 (ステンレス鋼, 4本) (直径 mm. 密度:7.93t/m³)





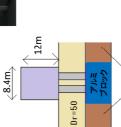


加振による沈下を防ぐため, ・建物部分と4本の杭は剛結

アルミブロック上に設置

・液状化地盤の層厚は杭長に合わせる

配づめも額



津波流速に関する相似則

Froude number=(flow velocity)/(Wave velocity)

 $|g_mL_m|$

Subcritical flow: Fr<1 Supercritical flow: Fr>1

p: prototype/m: model

Froude number	Fr	
Water depth	ш	
Flow velocity	s/w	

	Real	Model
	0.31	0.38
	11.0	9.10
0	3.22	3.56
	女川町の津波流速	実験時の津波流速 (実物換算値:拡張型相似則)

		₩	票	Ţ		
		4				
週票 间隔水压	残留	消散	残留	消散	残留	消散
化妆(mm)	43	43	23	23	83	83
夫颗ケート	Case 1-1	Case 1-2	Case 2-1	Case 2-2	Case 3-1	Case 3-2

亢長:3ケース 津波到達時の液状化:有無 拡張型相似則 1/10 実地盤

1/20

lai et al. (2005)

1/200

加速度振幅250 gal, 振動数0.53Hz, 繰り返し回数100回の正弦波

入力波・・・実物換算で

使用した砂:珪砂7号 相対密度:50%

ト フルード則

 $\mu \times \mu$ $\sqrt{1\times1}$ 流速に関する 相似則

拡張型相似則

(約1.8倍過大評価) $V_p = \mu^{0.75} \times V_m$ Flow velocity Water depth Froude number

1	s/m	ш	Fr
女川町の津波流速	3.22	11.0	0.31
実験時の津波流速 (実物換算値:拡張型相似則) (3.56 9. 女川での計測値3.22m/sの約1	9.10 .22m/sの約1.1倍)	0.38

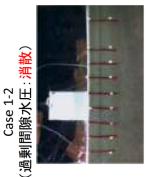
(再掲)

過剰間隙水圧の有無による比較

(過剰間隙水圧:残留=液状化)

Case 1-2





Case 2-1

Case 1-1

杭長(液状化層厚)の違い

(杭長:83mm) Case 3-1

(杭長:23mm)

(杭長:43mm)

水位上昇開始

加振開始

水位上昇開始

加振開始

Excess Pore Water Pressure (kPa) S S S S S S S S S

初期有効上載圧 計測値(PW2)

I

100 80 80 60 60 20 20 -20 -40 Pressure (kPa) Excess Pore Water

傾斜角:45°

傾斜角:35°

傾斜角:50。

20000

10000 Time (s)

000

500 Time (s)

まとめ

支配方程式による地盤模型実験の相似則の導出

•16場の相似則(長さと変位の縮尺の相違, 寸法効果など)

·遠心場の相似則(半径方向の加速度, Viscous scalingなど)

・拡張型相似則(遠心場で行う1G場模型実験)

拡張型相似則の適用例:液状化と「津波」の影響を受ける杭基礎

を有する建物の挙動(波力が現実と等価であるか?)

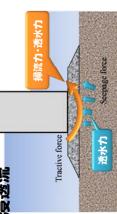




(杭長:23mm) Case 2-1

水みち距離・堤体構造) 堤内外水位差(6/11) 相互作用・連成散計法(極限問題 支持力・滑動・転倒 27024-11 研究のミッション -現象把握レベルとフォーカスレベル- 極限解析 現象把握しべ几 メンスケール 斯形・ 破壊 ミクロ (単) スケール 生起基準の明確化 商水力・適気力 |(有効応力の原理) 土塊 — 構造体 — フォーカス ナンジン 時間軸

ctive force 随水力 研究のミッション -地盤の浸食・洗掘現象に焦点をあてて・ ^{港外} Tractive force crosscurrent and vortex Bearing capacity failure Scouring due to Liquefaction-like Sliding • Falling



Tractive force



湖水力

松田達也 (Tatsuya Matsuda)

土木学会平成28年度全国大会第71回年次学術講演会 研究討論会 平成28年9月9日(金)13:00-15:00 『実験における地盤材料の評価 -水理学的アプローチと地盤エ学的アプローチー』

水際における地盤挙動の考察

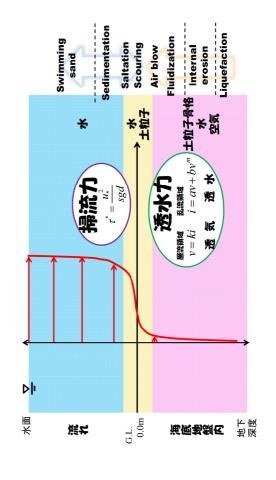
土粒子-要素に着目した

Toyohashi Univ. of Technology, Dept. of Architecture and Civil Engineering

Division of Geotechnology and Disaster Prevention, GeoMechanics Laboratory

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系地盤・防災講座: 地盤力学(三浦-松田)研究室

研究のミッション-地盤の浸食・洗掘現象に焦点をあてて-



掃流力・透水力(過剰間隙水圧)に関する考察 自由表面流れによる洗掘

プトー部

Unit: mm

- : Pore water pressure sensor

flow 🚺

地盤内間隙水圧計の設置箇所

500

500

scaped

impermeable seabed

1001

000'

Unit: mm

Channel Downstr

Pitot tube

実験装置の概要

5

1,250

実験概要一装置および計測機器

8 mm

50 CHIC

200

00

50

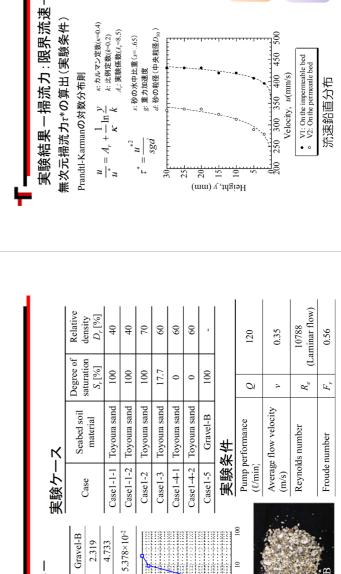
Seabed ground

CH5

EE35

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) 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.

小型間隙水圧計



無次元限界掃流力 au_c^* の算出(岩垣式)

土粒子

流速:"

自重:W

 $u_c^{*2}=134.6d^{31/22}$ $u_c^{*2}=8.41d^{11/32}$

 $u_c^{*2}=80.9d$ $u_{c}^{*2}-55.0d$

 $d \ge 0.303 \text{cm}$:

 $0.0065 \le d < 0.0565 \text{cm} : u_c^{*2} = 8.41 d^{11/32}$

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

Toyoura-sand (D₅₀=0.17mm)

 $0.0065 \le d < 0.0565$ cm:

d < 0.0065 cm:

 $0.0565 \le d < 0.118$ cm: $0.118 \le d < 0.303$ cm:

 $0.118 \le d < 0.303 \text{cm}: u_c^{*2} = 134.6 d^{31/22}$

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

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

実験概要一実験条件

Toyoura sand

Geo material

実験試料

0.116 0.173

 D_{50} (mm) Permeability D_{10} (mm)

2.210×10⁻⁴

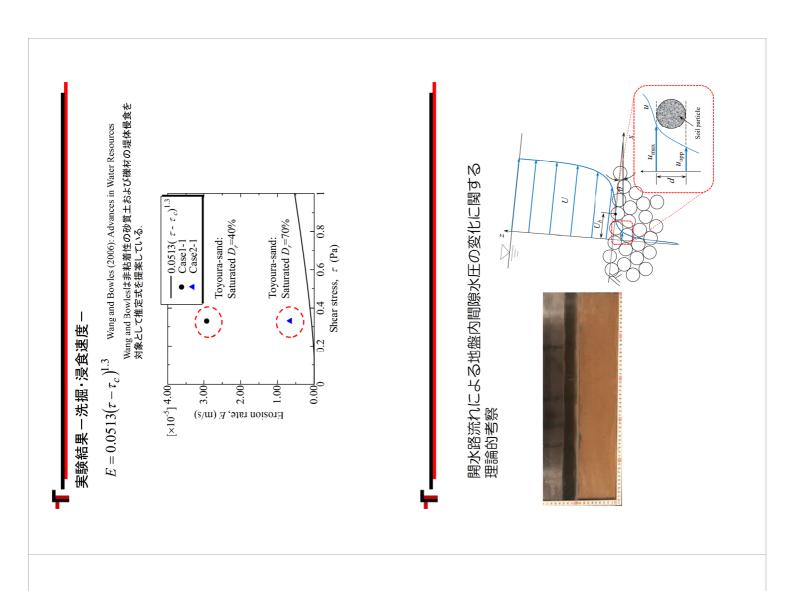
k (m/s)

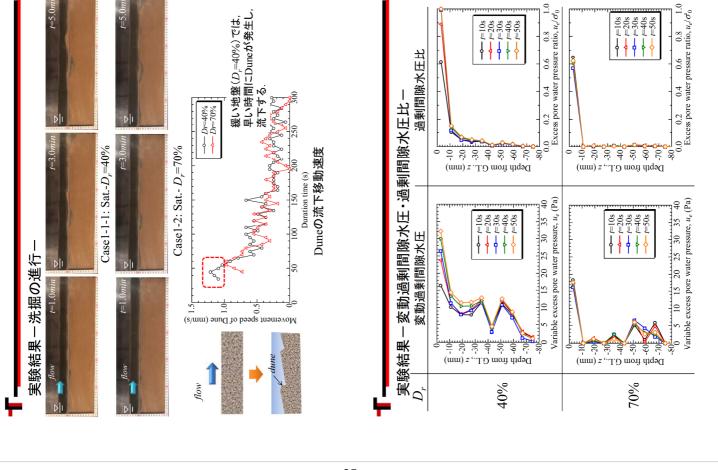
-D-Toyoura-s

Percent passing (%)

Particle size (mm)

0.01





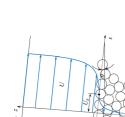
地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

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

$$\begin{split} \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \, \frac{\partial U_i}{\partial x_j} &= \frac{1}{\rho} \, \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + F_i \\ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} &= 0 \end{split}$$

ynolds平均をとった2次元Navier-Stokes方程式
$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + F_i \qquad U_i: 流速ベクトル \quad \rho: 水の \\ \frac{\partial U_i}{\partial t} = 0 \qquad \qquad P: 压力 \quad v_r: 渦動粘性係 \\ T_{ij} = -P \delta_{ij} + \rho v_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$



底面位置の補正量 z_0 を考慮した混合距離

$$v_T = I^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| = \left| \kappa \left(z + z_0 \right) \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \right|^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|$$

問題点として

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 1: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

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

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_d および透水性を表す長さスケール \sqrt{R} 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<math>0。

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

Reaは粗度高さと粘性底層厚さの比を表すReynolds数

底面の粗滑を決定する無次元量

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

 Re_{κ} は平均的な空隙の長さスケールと粘性底層厚さの比を表すReynolds数

$$Re_{K} = \frac{\sqrt{K}U_{f}}{V}$$

地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察

曼透流の流速分布

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

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

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

14: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

ν:水の動粘性係数

ーρ<u>u′iu′i</u> はReynolods応力テンソル

Darcyの抗力とForchheimerの抗力

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

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

Rek が比較的小さいとき

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

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

 R_{ek} が比較的大きいとき

F:Forchheimerの抗力

1:混合距離 (=kB) K:Darcyの抗力

ν:動粘性係数 宏調間:3

 $U = \left\lceil \frac{U_b}{\varepsilon} - \left(\frac{Kg\sin\theta}{\varepsilon vF} \right)^{\frac{1}{2}} \right\rceil \cdot \exp \left[\left(\frac{\varepsilon vF}{2\lambda^2 B^2 K} \right)^{\frac{1}{3}} z \right\rceil + \left(\frac{Kg\sin\theta}{\varepsilon vF} \right)^{\frac{1}{2}}$

混合距離 (I=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

Rek が比較的小さいとき

$$U_b = \left(\frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{K}{n}} + \frac{K}{\nu H}\right) U_f^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{\sqrt{K}}{H}\right) \text{Re}_K U_f$$

30

15 20 (uuu)z

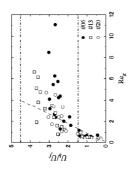
Depth from G.L.

VK/HIは1/√Eと比較すると十分小さいことから,以下のように近似

$$\frac{U_b}{U_f} = \frac{1}{\sqrt{n}} \operatorname{Re}_K$$

 R_{ek} が比較的大きいとき

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



13) Suga, K. et al: International Journal of Heart 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

地盤内の過剰間隙水圧

Bernoulliのエネルギー保存則より

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

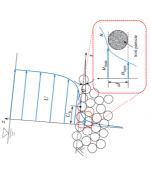
 C_L^* : 揭力係数

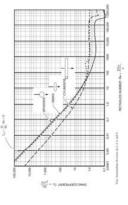
$$c_{_L}^{\ *}=0.54\cdot c_{_D}$$

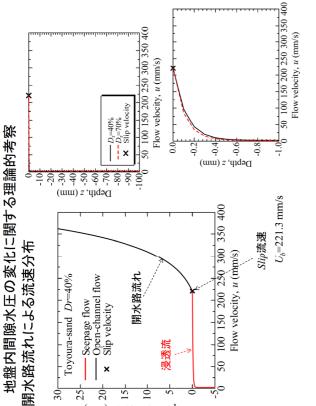
 C_D : 抗力係数

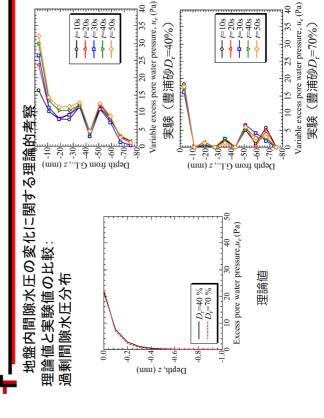
$$c_{_D} = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + 0.152 \sqrt{\text{Re}} + 0.0151 \text{Re} \right)$$

Re: 粒子レイノルズ数





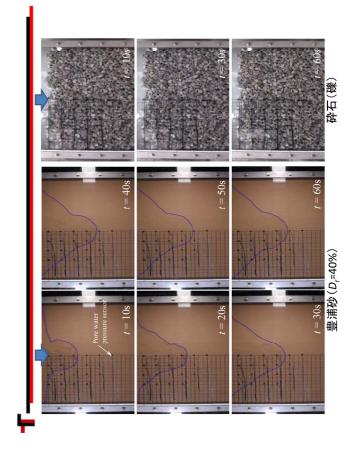


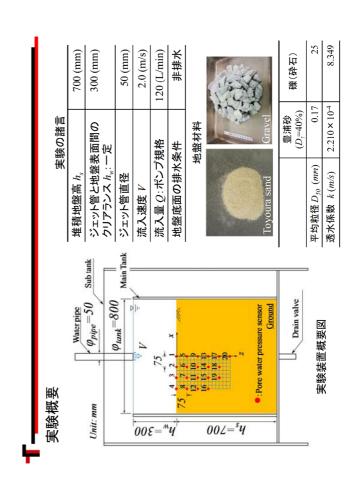


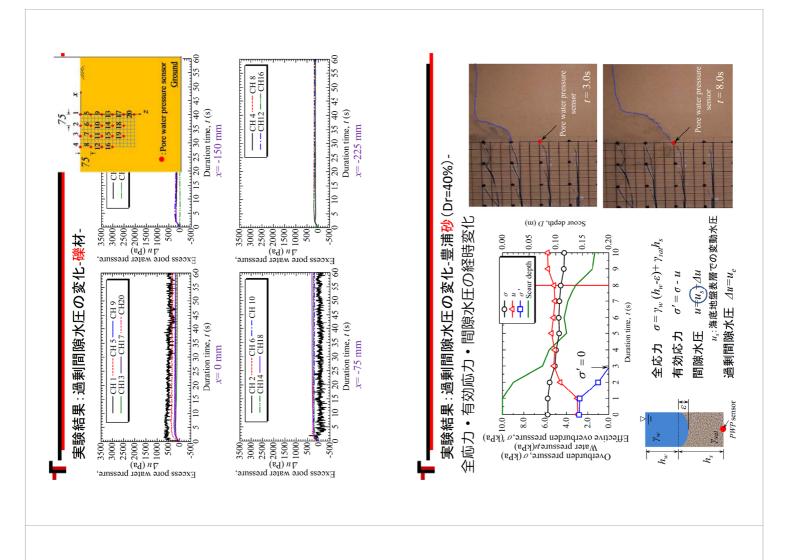
0. 0.2 0.4 0.6 0.8 1. Excess pore water pressure ratio, u_e/σ_0 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1. Excess pore water pressure ratio, u_e/σ'_0 → t=10s → t=20s → t=30s → t=40s ← t=50s (豊浦砂D=40%) 実験(豊浦砂D=70%) 地盤内間隙水圧の変化に関する理論的考察 実験 Depth from G.L. z (mm) Depth from G.L. z (mm) 70 70 -10 -20 -30 -40 -50 -60 Depth from G.L., z (mm) Excess pore water pressure ratio, u_e/σ_0 理論値と実験値の比較: 9.0 過剰間隙水圧比分布 理論值 $D_{\rm r} = 40 \%$ 4. -0.2 (mm) z (pth, z

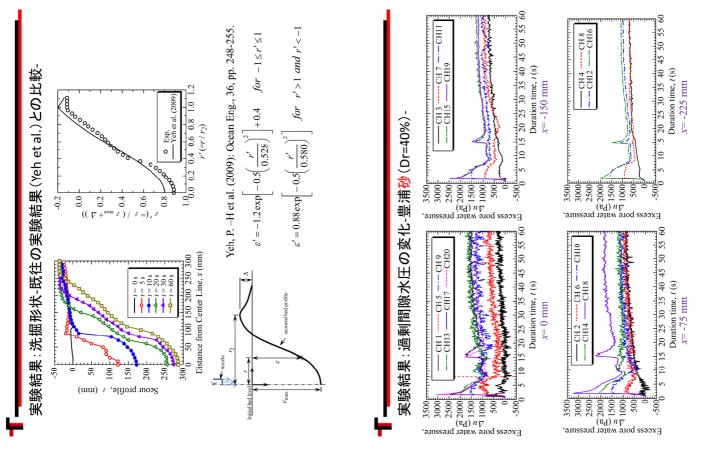
Jet流(鉛直噴流)による洗掘実験・解析

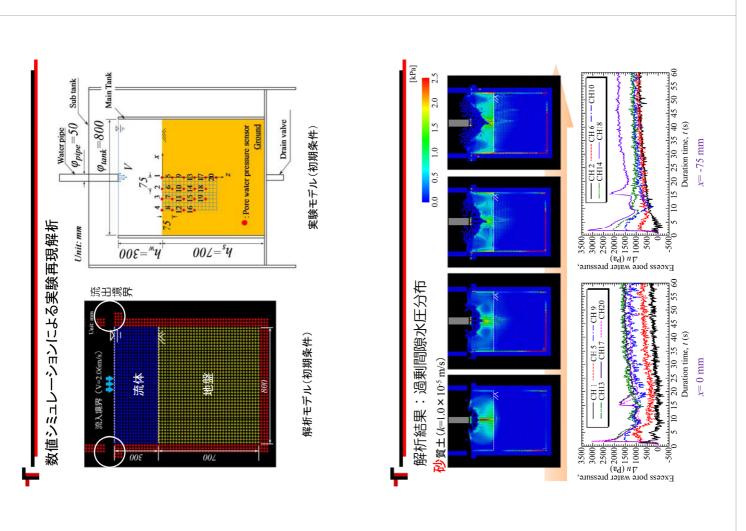
公田達也他(2014):土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1_1041-1_1045. 松田達也他(2016):土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.72, No.2, (場載決定)

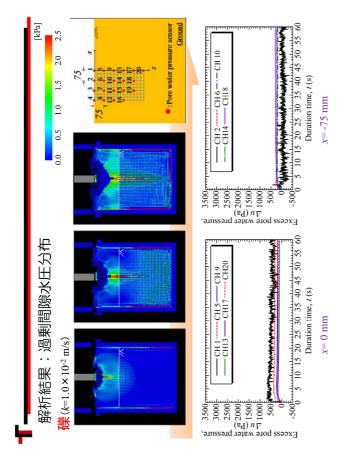












移動床実験により

- 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。
- 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 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 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