

第68回海岸工学講演会
企画セッション1: 波動と地盤の相互作用について考える

5. 波浪・地盤数値計算の方法論

東海国立大学機構名古屋大学
中村 友昭

1

5章の内容

5. 波浪・地盤数値計算の方法論

- 5.1 数値計算の役割(中村)
- 5.2 流体と地盤の統一解法の発展(有川先生, 中村)
- 5.3 流体と地盤の遷移領域の取り扱い(藤澤先生)
- 5.4 粒子法による底質土砂輸送(原田先生)
- 5.5 格子法による地盤の波浪応答(中村)

中村からは5.2と5.5の内容を紹介
藤澤先生より5.3の内容を紹介

2

5.2 流体と地盤の統一解法の発展

- 海岸工学委員会数値波動水槽研究小委員会による4つの区分に基づいて統一解法を分類

表5.2.1

区分	波の取り扱い	地盤の取り扱い
Type 1	微小振幅波理論など理論的に与える	支配方程式を有限要素法などで解析する
Type 2	数値解析で与える	支配方程式を有限要素法などで解析する
Type 3	微小振幅波理論など理論的に与える	個別要素法などで解析する
Type 4	数値解析で与える	個別要素法などで解析する

- Type 2～4は波浪と地盤の相互作用を取り扱える
- Type 2は「5.2.1 格子法」で, Type 3, 4は「5.2.2 粒子法」で紹介. また, 両者のカップリングを5.2.3で紹介

3

5.2.1 格子法

- 波浪と地盤のカップリング手法に基づいてさらに分類
 - Type A (All): 地盤の内部を含む領域全体の流体運動を解き, その後に地盤の水・土連成解析を行う

表5.2.2

波動場	ポテンシャル				
	BEM	●			
	VOF		●		
	CADMAS				
	OpenFOAM				
	RANS			●	●
浸透流解析		●			
	地盤 圧密方程式	●			
	u-p形式		●	●	●
	u-w形式				
	u-w-p形式				
構成式	線形弾性体	●	●	●	
	弾塑性体				●
年代	2000年以前	水谷・Mostafa (1997) [2D]			
	2000-2010		中村ら(2005) [2D]	Hsuら(2002) [2D]	
	2010-2020		中村ら(2013) [3D]	Yeら(2013) [3D]	Yeら(2015) [3D]
備考	カップリング	one-way	one-way	one-way	one-way

4

5.2.1 格子法

- Type W (Wave): **地盤内部を除く領域**の流体運動を解き、
その後に地盤の水・土連成解析を行う

表5.2.3(一部抜粋)

波動場	ポテンシャル	●				
	BEM					
	VOF					
	CADMAS		●	●	●	
	OpenFOAM					●
	RANS					
浸透流解析						
地盤	圧密方程式				●	
	u-p形式			●		●
	u-w形式	●	●		●	
	u-w-p形式					
構成式	線形弾性体	●	●	●		●
	弾塑性体				●	
年代	2000年以前	朴ら(1996) [2D]				
	2000-2010		蔭ら(2000) [2D] 前野・藤田(2001) [2D]	高橋ら(2002) [2D]	有川ら(2009) [3D]	
	2010-2020					Liら(2020) [3D]
備考	カップリング	two-way	疑似two-way/one-way	one-way	疑似two-way	one-way

5

5.2.2 粒子法, 5.2.3 カップリング

- DEM
 - 後藤ら^{5.2.37), 5.2.41)}, 後藤・酒井^{5.2.38)}, 酒井ら^{5.2.39)}, 陳ら^{5.2.40)}, 原田ら^{5.2.42)}, 本田ら^{5.2.43)}, 高山ら^{5.2.44)}, 高山・高橋^{5.2.45)}, 辻尾ら^{5.2.46)}
- MPS
 - 後藤ら^{5.2.47), 5.2.49), 5.2.51), 5.2.52)}, 五十里ら^{5.2.48), 5.2.50), 5.2.53)},
^{5.2.54), 5.2.55), 5.2.56)}, 清水ら^{5.2.57)}
- SPH
 - 今瀬ら^{5.2.58), 5.2.59)}, 大家ら^{5.2.60)}, Gotoら^{5.2.61)}, 三通田・有川^{5.2.62)}, 上島・佐藤^{5.2.63)}, 後藤ら^{5.2.64)}, 鶴田ら^{5.2.65)}
- カップリング
 - 前野ら^{5.2.66)}, 山口ら^{5.2.67)}

5.2の詳細は書籍をご覧ください

6

5.5 格子法による地盤の波浪応答

- 多孔質体から受ける抵抗力のモデル化に着目し、透水性の観点から相似則について検討
 - 2018年開催の第65回海岸工学講演会前日シンポジウムの内容を更新・整理して掲載
- CADMAS-SURF/3D(有川ら^{5.5.2)}), FS3M(中村・水谷^{5.5.3)}), Kozeny-Carman^{5.5.4)}の式, van Gent^{5.5.5)}のモデル化を対象
- 非圧縮性粘性流体に対するNavier-Stokes方程式(x 軸方向)を以下の形で整理する

$$\dots = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \underbrace{a g m^2 u}_{\text{線形抵抗力係数 (透水係数 } k \text{ の逆数に相当)}} - \underbrace{b g m^3 u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}_{\text{非線形抵抗力係数 (抗力係数に相当)}} + \dots$$

u, v, w : 実流速
 m : 空隙率
 p : 圧力
 ρ : 流体の密度

7

5.5 格子法による地盤の波浪応答

線形抵抗力

表5.5.1

$$\dots = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - a g m^2 u + \dots$$

α_0, C_{D2}, α : パラメータ
 m : 空隙率
 d : 粒径
 ν : 動粘性係数
 g : 重力加速度

	$a (= 1/k) [s/m]$
CADMAS-SURF/3D	$\alpha_0 \frac{(1-m)^3}{m^2} \frac{\nu}{gd^2}$
FS3M	$12 C_{D2} \frac{1-m}{m^2} \frac{\nu}{gd^2}$
Kozeny-Carman	$180 \frac{(1-m)^2}{m^3} \frac{\nu}{gd^2}$
van Gent	$\alpha \frac{(1-m)^2}{m^3} \frac{\nu}{gd^2}$

- 線形抵抗力が卓越する状況, $\dots = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - a g m^2 u + \dots$
 すなわちDarcy則が成立する
 x 軸方向の1次元場を考えると, mg で除算
- 動水勾配 $i = a \mu u = 1/k \mu u$

- 左辺の動水勾配 i はスケールによらない $i = a \mu u = 1/k \mu u$
- 右辺の流速 u はFroude則より $1/N^{0.5}$

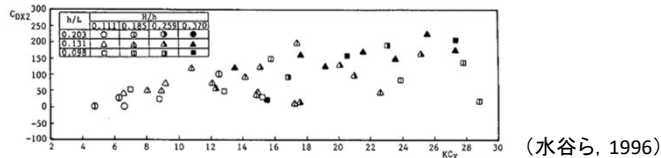
透水係数 k も $1/N^{0.5}$ であればよい $\Rightarrow$ 粒径 d は $1/N^{0.25}$ とすればよい

8

5.5 格子法による地盤の波浪応答

– 係数 (α_0 , C_{D2} , α) の設定

- 係数はKC数に依存



- 前頁に基づいて模型の粒径 d を原型の $1/N^{0.25}$ としたとき、模型のKC数は原型の $1/N^{0.75}$ となり一致せず

⇒ KC数によって係数を調整する必要があると思われる

– Dean数に基づく相似則との関係

- 粒径 d が小さいとき ($\approx$ Darcy則が成立するとき), Dean数に基づく相似則では粒径は $1/N^{0.25}$ に漸近するため, Dean数に基づく相似則と透水性に基づく相似則は一致
- 粒径 d が大きいとき, Dean数に基づく相似則では粒径は $1/N$ に漸近するため, 矛盾

9

5.5 格子法による地盤の波浪応答

• 非線形抵抗力

表5.5.2

$$\dots = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - b g m^3 u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \dots$$

β_0 , C_{D1} , β : パラメータ

m : 空隙率

d : 粒径

KC: KC数 ($= u_{\max} T/d$)

g : 重力加速度

	b [s^2/m^2]
CADMAS-SURF/3D	$\beta_0 \frac{1-m}{m^3} \frac{1}{gd}$
FS3M	$\frac{1}{2} C_{D1} \frac{1-m}{m^3} \frac{1}{gd}$
van Gent	$\beta \left(1 + \frac{7.5}{KC}\right) \frac{1-m}{m^3} \frac{1}{gd}$

$$\dots = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - b g m^3 u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} + \dots$$

- 抗力が卓越する x 軸方向の1次元場を考えると

$$\text{動水勾配 } i = b \mu u |\mu u| = -1/\rho g \partial p / \partial x$$

μu : 流量流速
(Darcy流速)

m : 空隙率

- 左辺の動水勾配 i はスケールによらない

- 右辺の流速 u はFroude則より $1/N^{0.5}$

⇒ 係数 b は N 倍であればよい

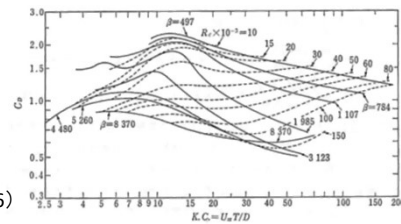
⇒ 粒径 d は $1/N$ とすればよい (Froude則通り)

$$i = b \mu u |\mu u|$$

10

5.5 格子法による地盤の波浪応答

- 係数 (β, β_0, C_{D1}) の設定
 - 係数はKC数とReynolds数に依存



(Sarpkaya, 1976)

- 前頁に基づいて模型の粒径 d を原型の $1/N$ としたとき、KC数は模型と原型で一致
- 模型のReynolds数は原型の $1/N^{1.5}$ となり一致せず
 - ⇒ Reynolds数によって係数を調整する必要があると思われる
- Dean numberに基づく相似則との関係
 - 粒径 d が大きいとき($\approx$ 抗力が卓越するとき), Dean数に基づく相似則では粒径は $1/N$ に漸近するため, Froude則, Dean数に基づく相似則, 透水性に基づく相似則はすべて一致
 - 粒径 d が小さいとき, Dean数に基づく相似則では粒径は $1/N^{0.25}$ に漸近するため, 矛盾

11

5.5 格子法による地盤の波浪応答

- 以上を実験の視点から見てみると、
 - － 仮定：
 - 模型の寸法縮尺を原型の $1/N$ とする
 - 模型と原型で動粘性係数の等しい流体を使用
 - 抗力が卓越する状況を想定
 - － 前頁より、模型のReynolds数は原型の $1/N^{1.5}$ に小さくなる。このとき、一般的に模型の抗力係数(β, β_0, C_{D1})、つまり非線形抵抗力は原型よりも大きくなる
 - 小規模な実験ほど反射率や透過率が低下するとしている鹿島ら^{5.5.8)}や榊山・小笠原^{5.5.9)}の実験結果と整合的
 - － 抗力係数が大きくなった分だけ、空隙率を大きくする工夫をすれば模型を原型に近づけることも不可能ではないと考えられるが、困難
 - 空隙率を変化させると多孔質体の骨格構造が模型と原型で異なることになり、そのために係数(β, β_0, C_{D1})も変化すると推測

12

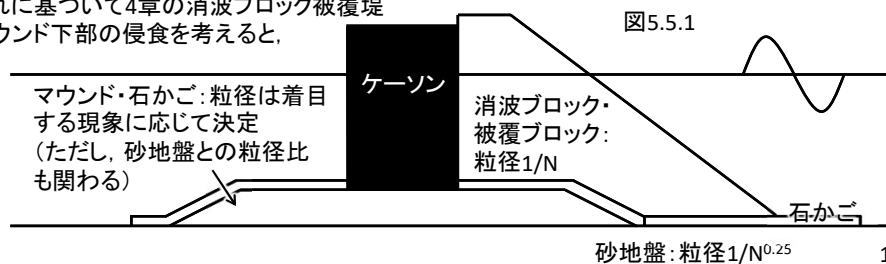
5.5 格子法による地盤の波浪応答

• まとめ

表5.5.3(多孔質体の分類と卓越成分はGu・Wang^{5.5.10})に基づく)

	大きさ	抵抗力の卓越成分	粒径 (Froude則)	粒径 (Dean数)	粒径 (抵抗力)	抵抗力の係数
粗砂以下	< 2 mm	線形	$1/N$	$1/N^{0.25}$	$1/N^{0.25}$	KC数依存
小礫	1 cm	線形・非線形	$1/N$	$1/N - 1/N^{0.25}$	一意に決定できず	
大礫	10 cm	非線形	$1/N$	$1/N$	$1/N$	Reynolds数依存
巨礫	0.3-1.0 m					
ブロック, 巨岩	> 1.0 m					

これに基づいて4章の消波ブロック被覆堤マウンド下部の侵食を考えると,



13

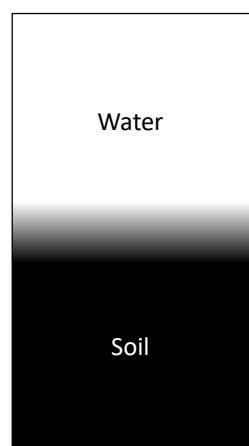
第5.3節 流体と地盤の遷移領域の取扱い

京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻 准教授
藤澤 和謙

1

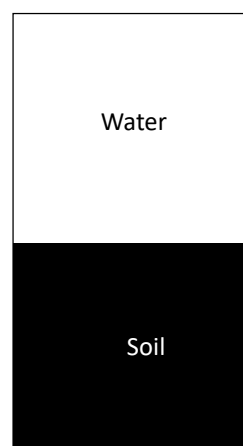
Navier-Stokes/Darcy Coupling

Single-domain method



- ・計算が簡単
 - ・境界近傍の材料定数不正確。
- 境界近傍の流れに精度を欠く。

Two-domain method



- ・境界が明確に定義される。
- 境界近傍の流れを正確に表現
- ・計算が簡単ではない。
 - ・動的な解析は少ない。

2

Difficulties & Applications

Single-domain method

一つの平均化方程式を解く

Two-domain method

土・水境界に適切な条件を課して、支配方程式を解く

1. 質量保存則（境界の**法線方向流速の連続性**）
2. 適切な土・水境界の**接線方向流速の条件**
3. （経験的には）圧力又は応力の連続性

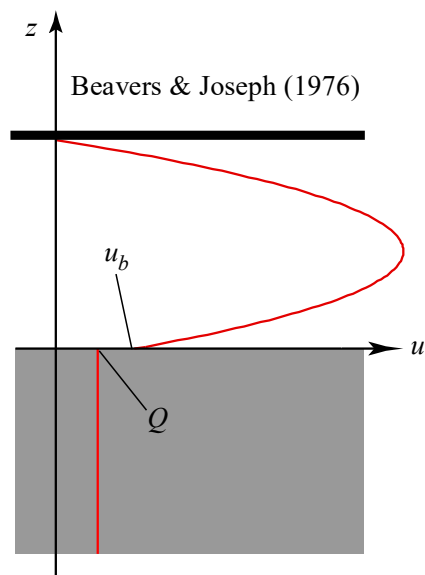
3

Beavers-Joseph interfacial condition

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = \frac{\alpha}{\sqrt{K}} (u_b - Q)$$

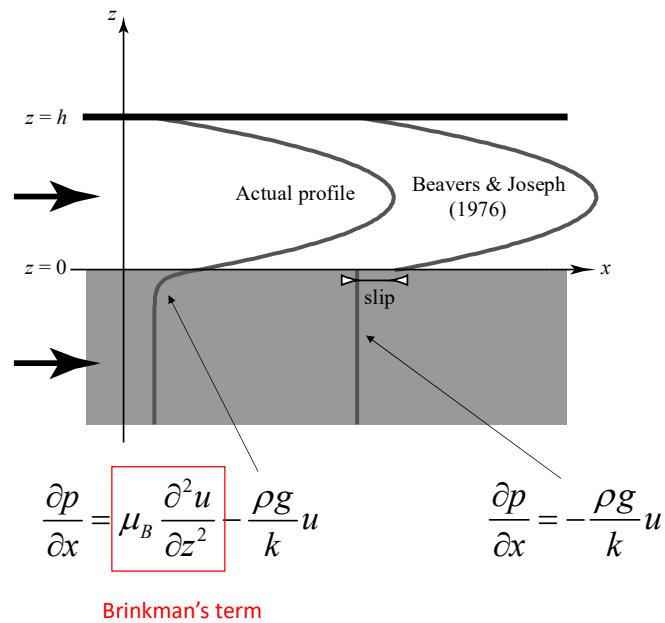
$$K = kv / g$$

- 境界面の条件を流速勾配が流体での流速とダルシー流速の差で規定。（不連続なモデル化）
- K は固有透水係数と呼ばれ、長さの二乗の次元をもつ。その平方根は、間隙径と同じオーダーとなる。



4

'Discontinuous' to 'Continuous'



5

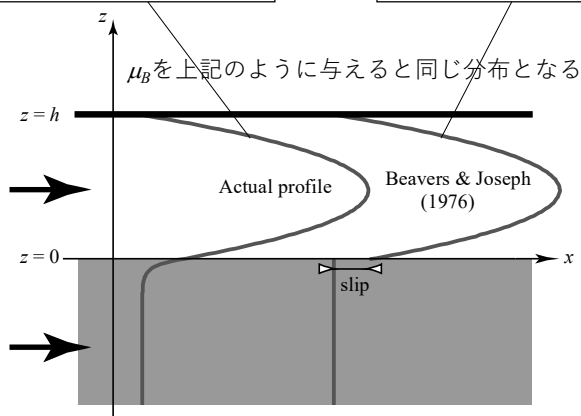
Effect of Brinkman's term

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu_B \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\rho g}{k} u$$

$$\mu_B = \frac{\mu}{\alpha^2}$$

$$\left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = \frac{\alpha}{\sqrt{K}} (u_B - Q)$$

$$K = kv / g$$



6

Navier-Stokes/Darcy flow coupling

Navier-Stokes equations for water flow

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

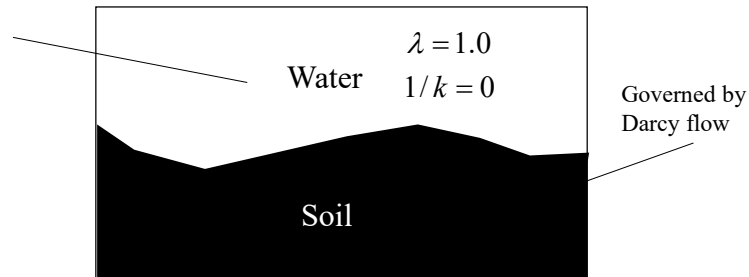
Governed by
Navier-Stokes equations

Seepage flow equation in soil

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad u_i = \text{Darcy flow velocity}$$

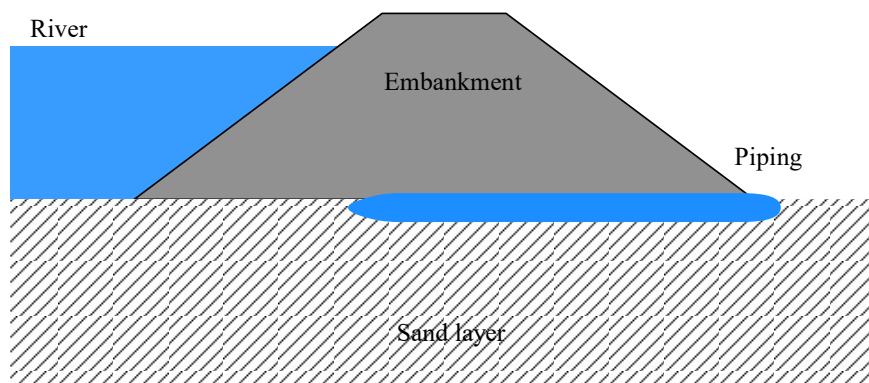
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_i u_j}{\lambda} \right) = -\frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\lambda g}{k} u_i$$

λ = porosity, k = hydraulic conductivity



7

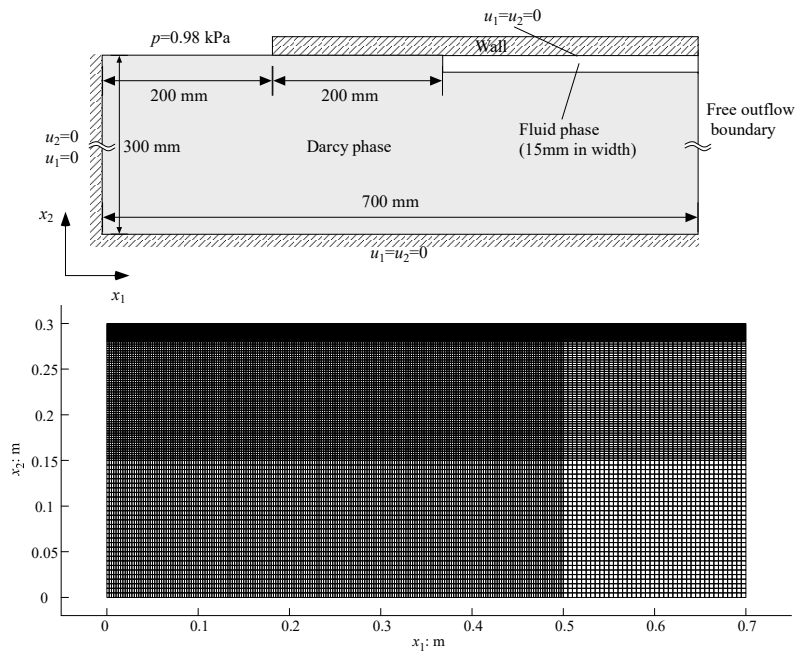
Practical example



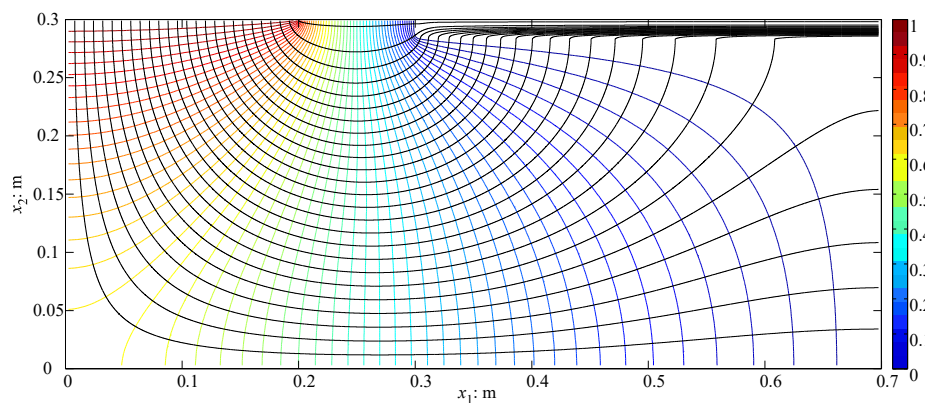
堤防下部におけるパイピング (Backward erosion)

8

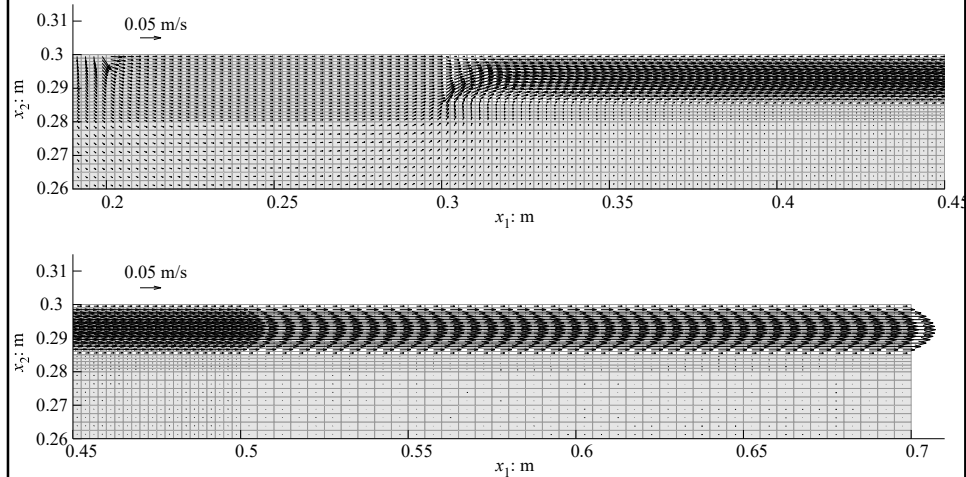
Pipe-flow



Pressure and stream lines

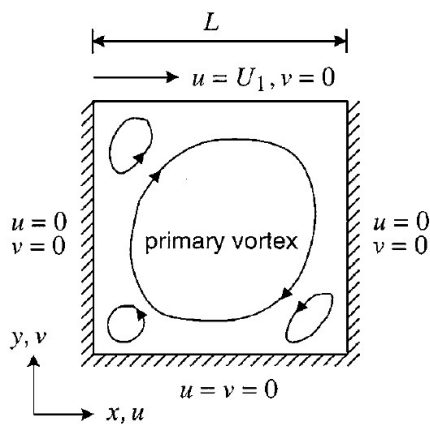


Velocity around soil pipe

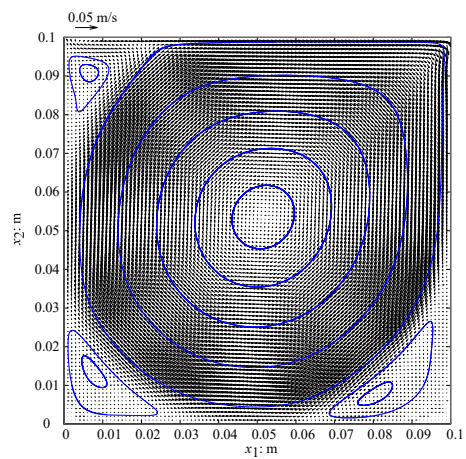


11

The lid-driven cavity flow



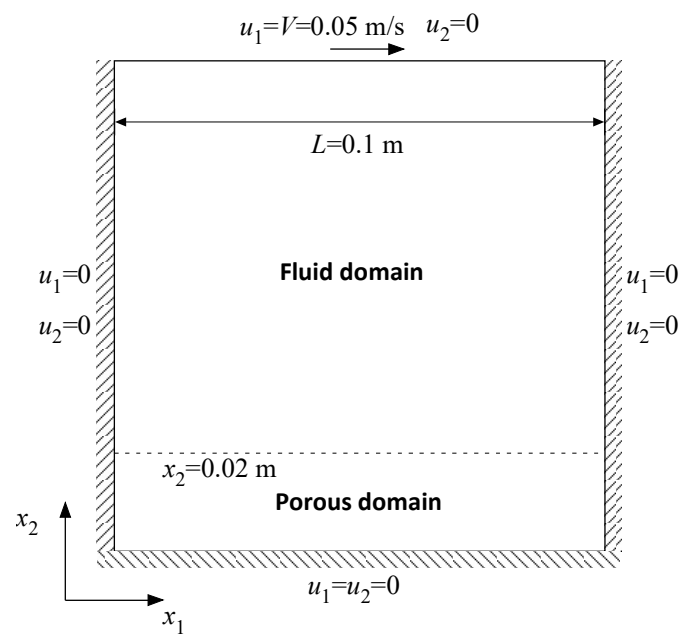
Re= 5000



Kim, D. and Choi, H. (2000): A second-order time-accurate finite volume method for unsteady incompressible flow on hybrid unstructured grids, *Journal of Computational Physics*, 162, 411–428.

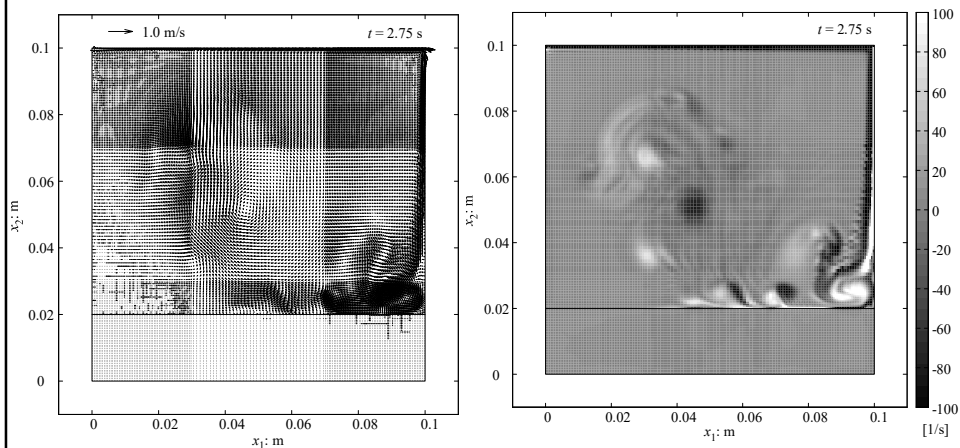
12

The cavity flow above the porous domain



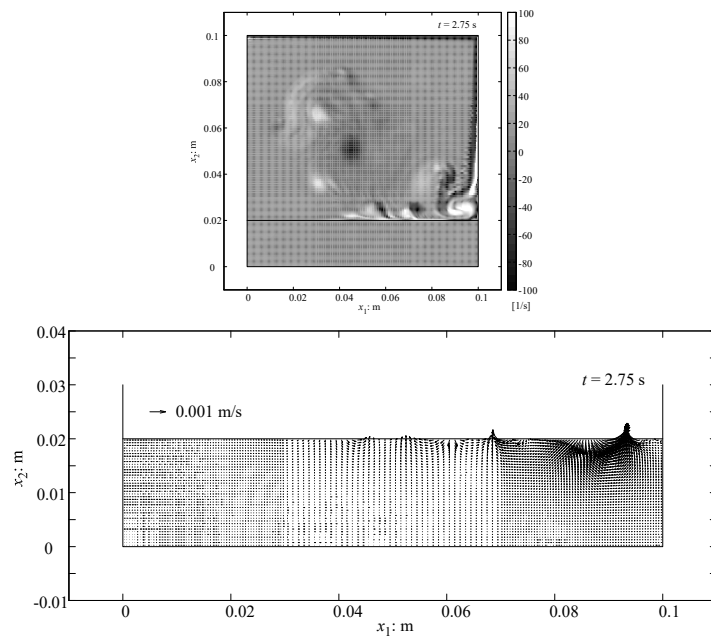
13

Velocity and Vorticity (Fluid domain)



14

Velocity and Vorticity (Porous domain)



15

第68回海岸工学講演会(2021)
企画セッション(1)
—波動と地盤の相互採用について考える—

パネルディスカッション
話題提供(最近の研究)

松田 達也 (Tatsuya MATSUDA)

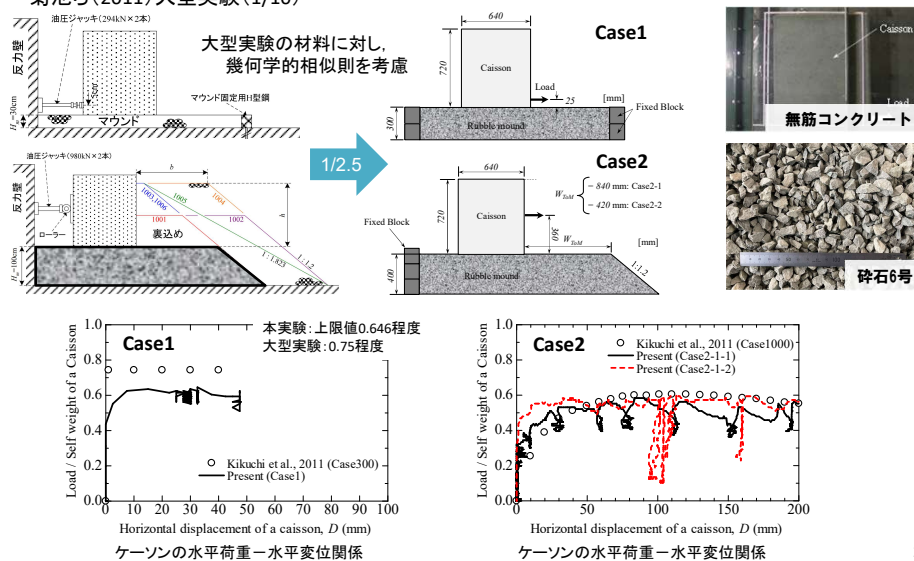
豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系
地盤・防災講座: 地盤力学(三浦・松田・内藤)研究室
Toyohashi Univ. of Technology, Dept. of Architecture and Civil Engineering
Division of Geotechnology and Disaster Prevention, GeoMechanics Laboratory

研究成果

縮尺模型実験における破壊モードの相似性(相似則)

菊池ら(2011)大型実験(1/10)

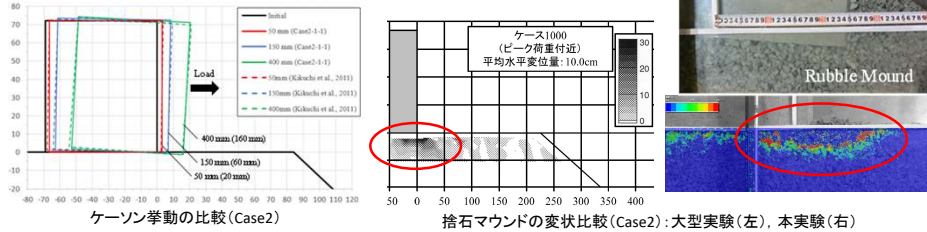
本実験(1/25)



2

研究成果

縮尺模型実験における破壊モードの相似性(相似則)



まとめ

- 摩擦係数計測試験 (Case1) の結果, ケーソンと捨石間の摩擦係数に差異が生じた. 要因として, **捨石マウンドの均し方法や密度の影響**等が考えられる.
- 偏心荷重載荷試験 (Case2) の結果, **ケーソンの挙動は類似**しており, **水平荷重-水平変位関係は定量的に同様な傾向**を示した. マウンドの変状はケーソン後趾付近で変形するような傾向が示され, 定性的に同様の傾向が得られた.

菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也: 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.67, No.4, pp.474-487, 2011.

謝辞: 日本学術振興会科学研究費補助金若手研究20K14824の助成, 豊橋技術科学大学教育研究活性化経費の助成を受けております. また, 菊池喜昭教授(東京理科大学)より本稿への引用についてご承諾を頂きました. ここに記して謝意を表します.

松田達也他(2021): ケーソン-捨石構造の破壊モードに着目した重力場における模型実験でのモデリング・オブ・モデルズ, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp.1_769-1_774, 2021.