

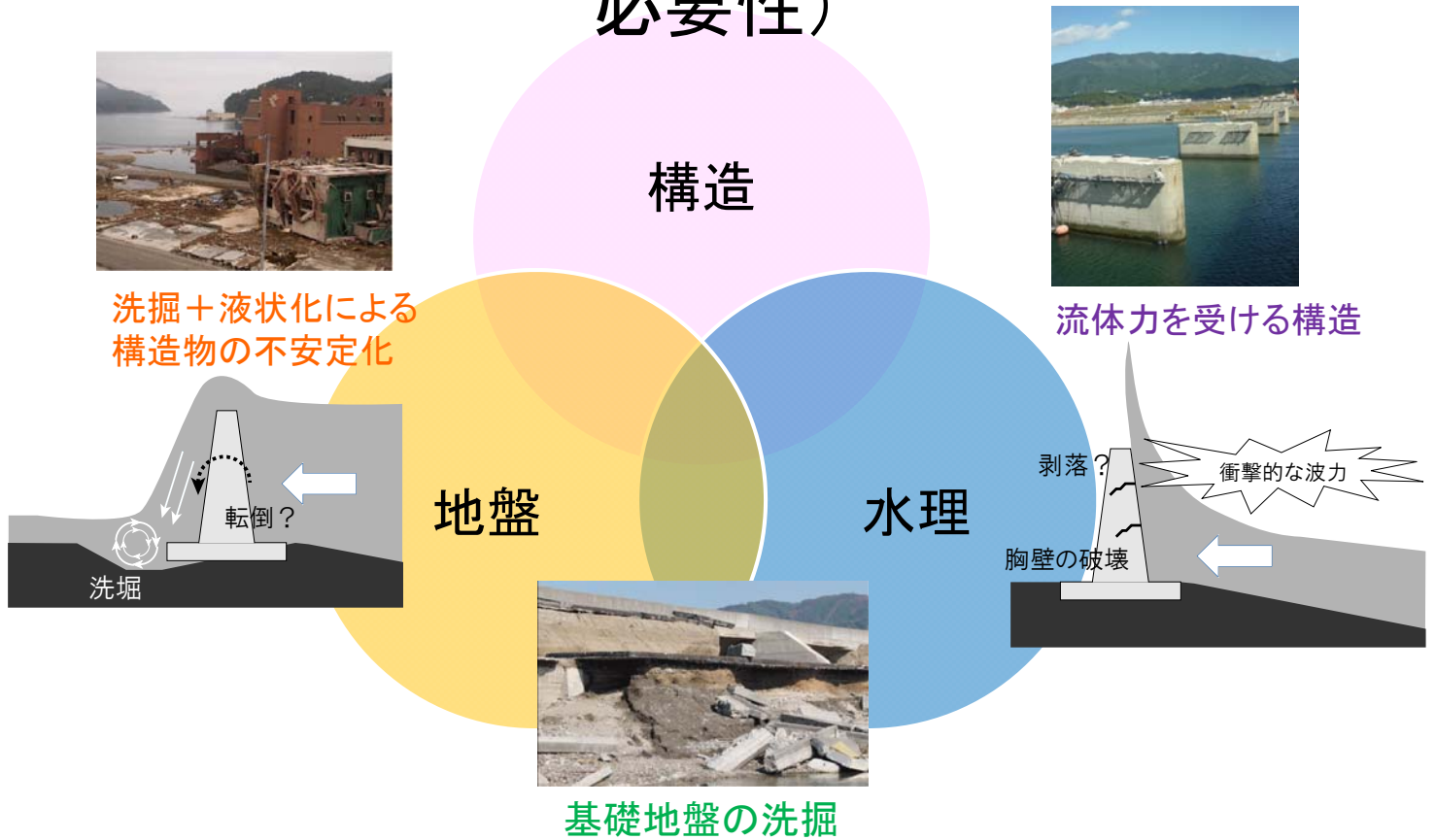
沿岸構造物におけるFEM-SPH法 による大規模シミュレーション

荻野正雄 (名大・情報基盤センター),
浅井光輝 (九大・工学研究院社会基盤部門),
田上大助 (九大・マスフォアインダストリ研究所),
渡部善隆 (九大・情報基盤研究開発センター)
2017年4月28日(金)

研究成果の概要

- 2012年度(1年目)の成果
 - [FEM] 地盤-橋梁モデルにおける反復法の収束性改善
 - [SPH] 数値解析手法の安定化・高精度地形モデル構築
- 2013年度(2年目)の成果
 - [SPH] 実験値との比較, 流体-構造(剛体)連成解析
- 2014年度(3年目)の成果
 - [SPH-FEM] 流体-構造(弾性体)連成による道路橋モデル解析
 - 津波防災教育向けに高知市モデルの作成と解析
- 2015年度(4年目)の成果
 - [FEM] コンクリートひび割れ解析
 - [SPH] 多段階ブーミング解析開発・空間解像度と津波浸水域評価実施
 - 大型浮遊物衝突を考慮した津波避難ビルの安全性評価
- **2016年度(5年目)の成果**
 - [SPH] 流体解析及び流体剛体連成解析におけるV&V
 - [SPH-FEM] REVOCAP_Couplerによる弱連成解析システム開発

津波複合被害(マルチフィジックス解析の必要性)



Structural Analysis Lab., Kyushu University

SPH法における粒子離散化

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

物体を有限個の粒子に離散化し、その任意の点の物理量を近傍粒子の物理量の重みつき平均として近似

$$f(x) = \int f(x^J) W(x - x^J, h) dV$$

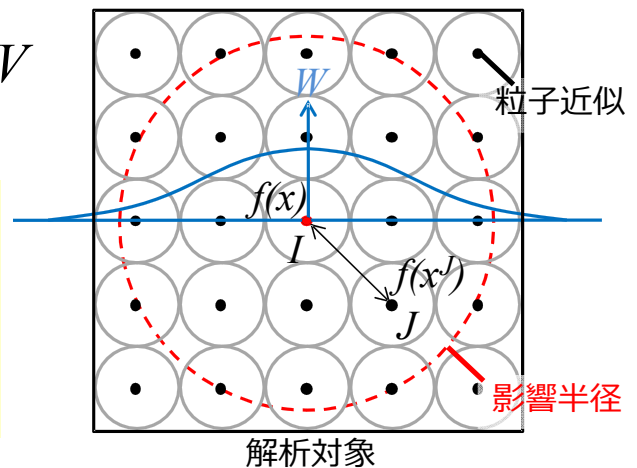
$$f(x) \approx \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} f(x^J) W(x - x^J, h)$$

対象粒子(i)の物理量

近傍粒子(j)の物理量

粒子間距離

重み関数

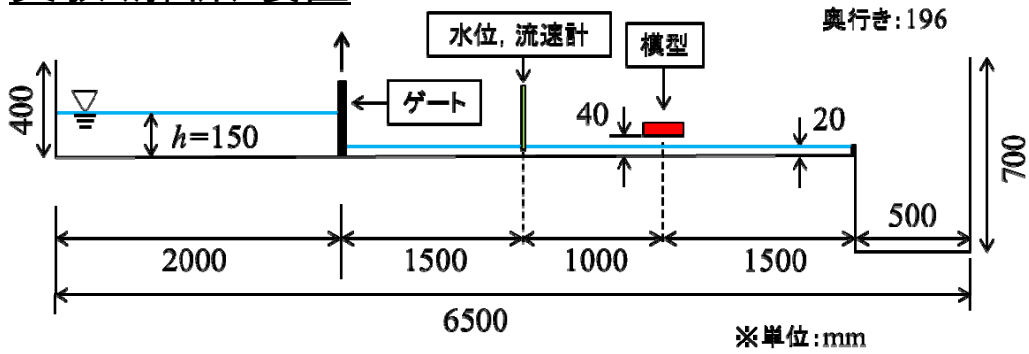


<特徴>

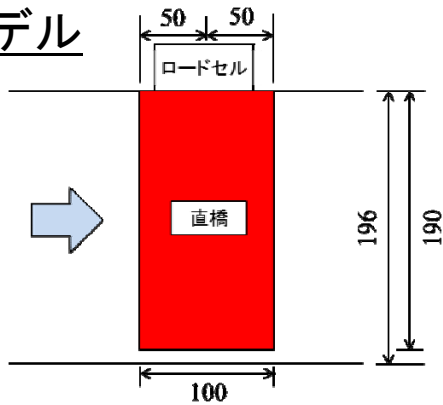
- ① 完全ラグランジュ型のメッシュレス法(強形式型解法・領域積分なし)
- ② メッシュを定義する必要なし、簡単に粒子を追加、消去が可能
- ③ 粒子間隔が均等であることが重要

流体力精度検証 橋梁の対津波設計に関する研究小委員会(伊津野)

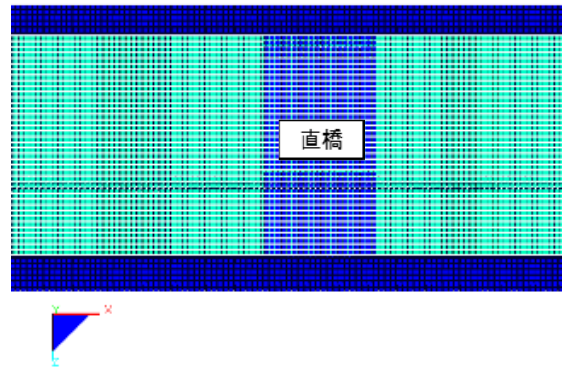
実験(解析)装置



実験モデル



解析モデル



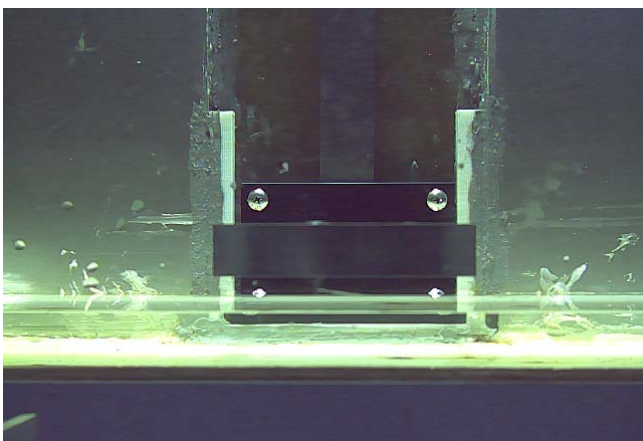
6

流体力精度検証

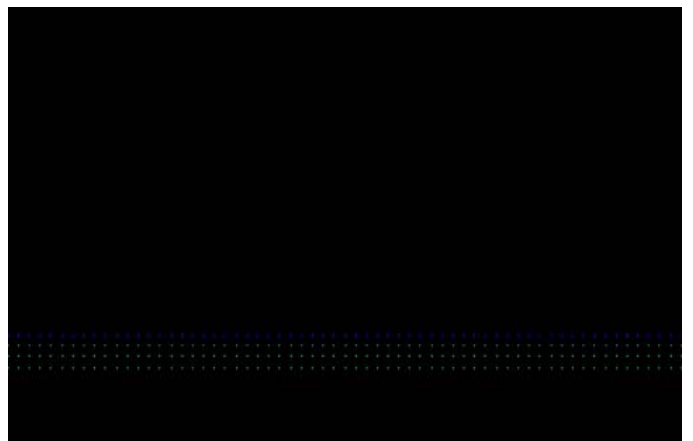
解析条件

粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間(16node)
0.5cm	約250万	0.0005sec	5sec	約12時間

実験動画

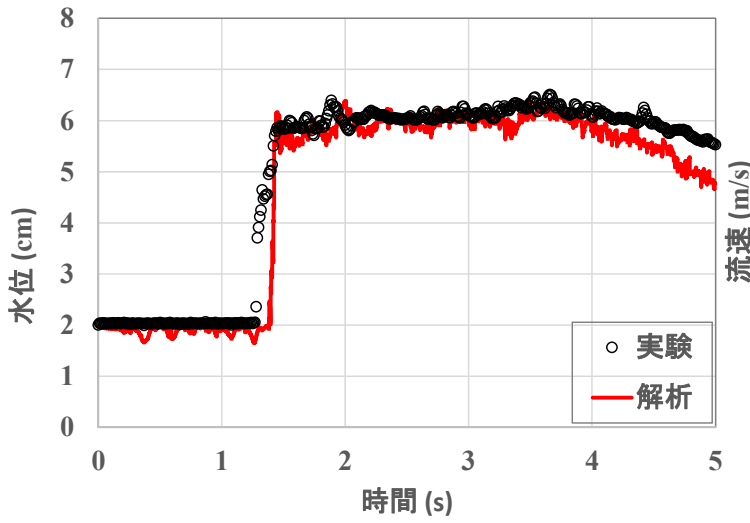


解析動画

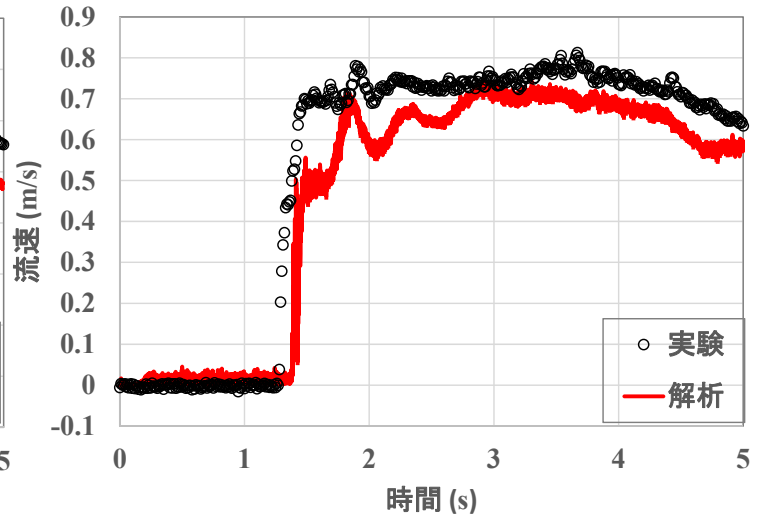


流体力精度検証の結果

水位



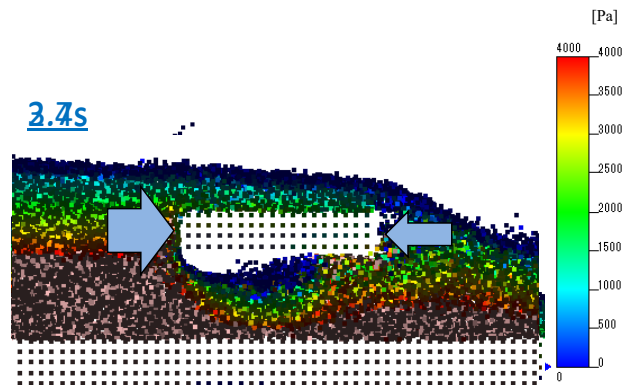
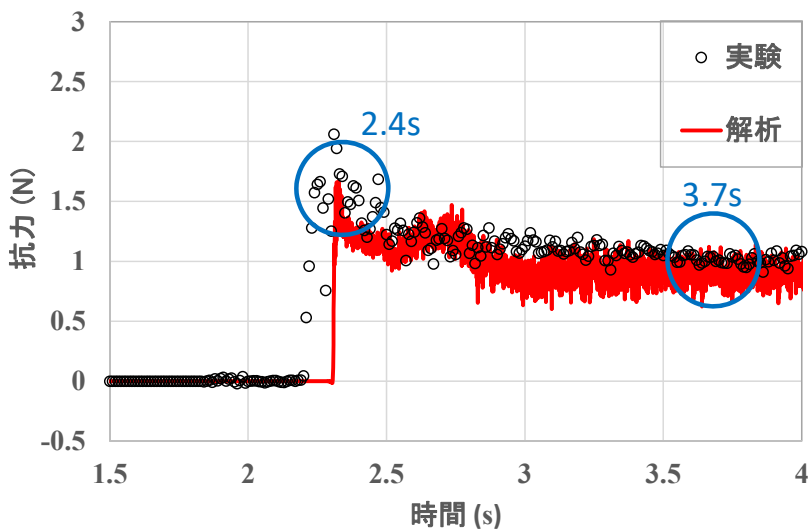
流速



8

流体力精度検証の結果

水平方向の力(抗力)

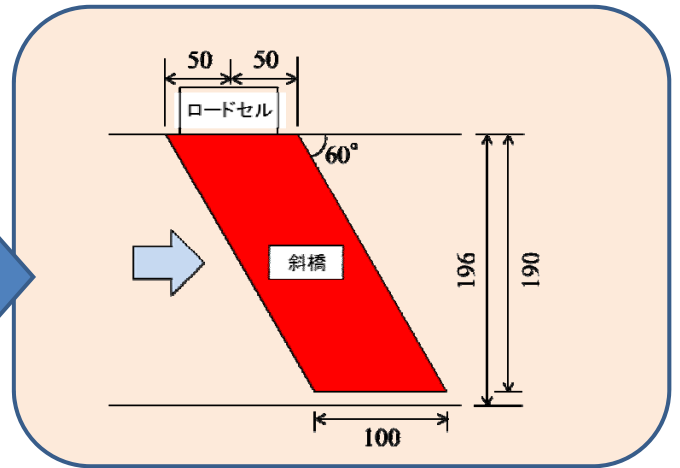
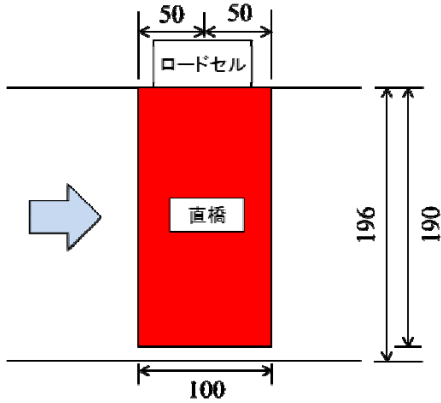


9

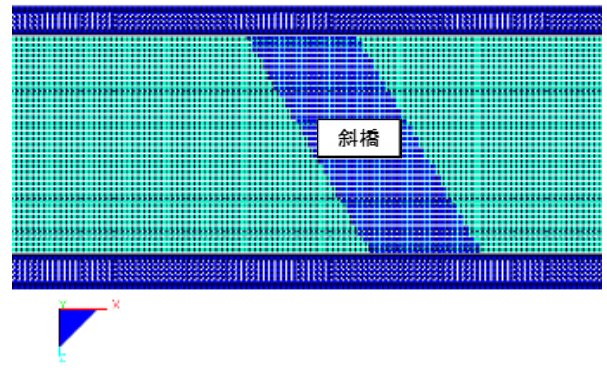
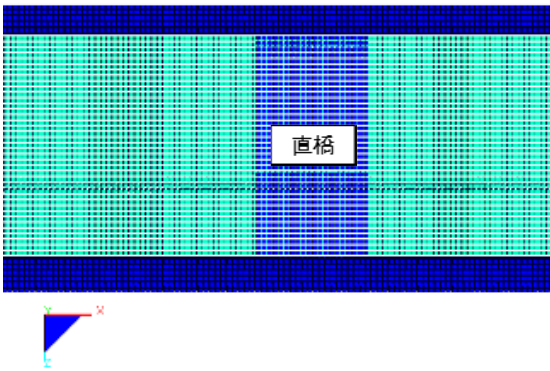
模型の変更とブラインドテスト

ブラインドテスト

実験

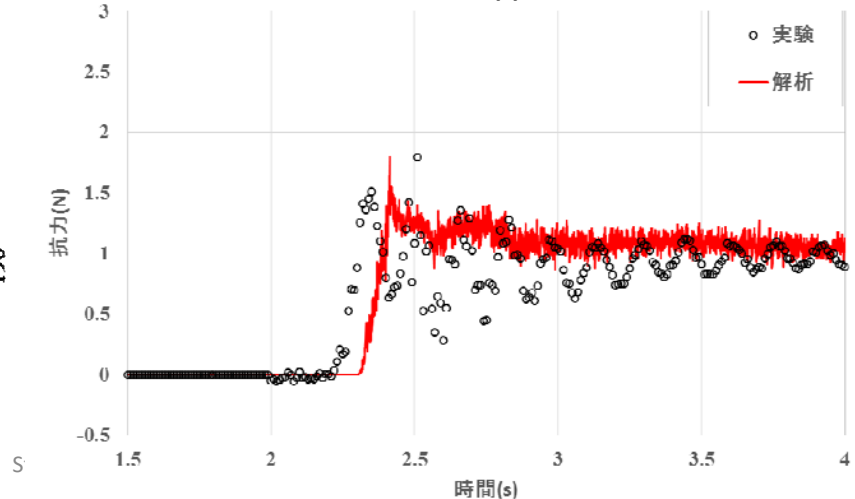
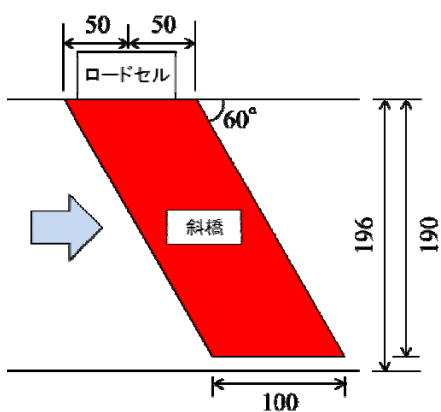
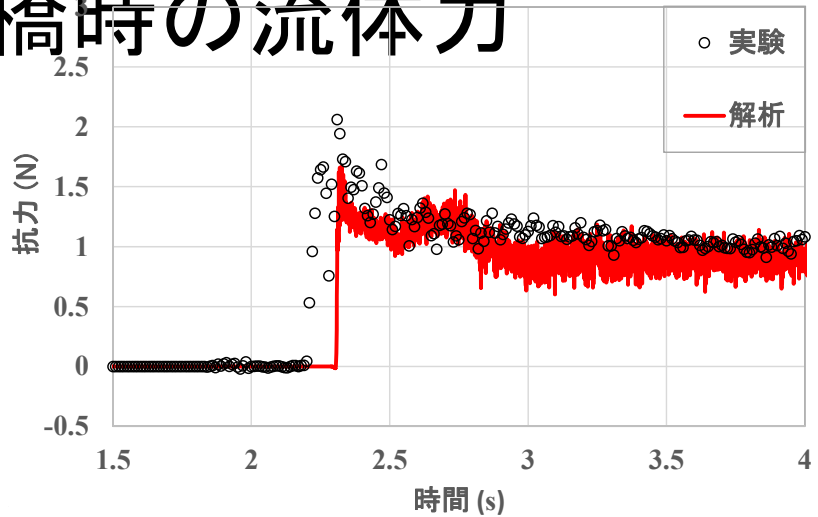
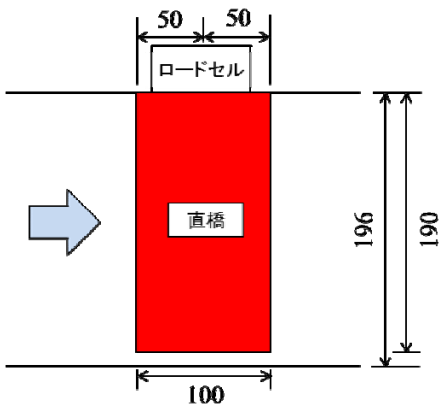


解析



10

斜橋時の流体力



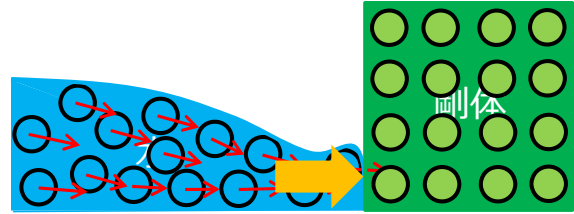
剛体移動の扱い方(1/2)

・剛体運動のアルゴリズム

剛体も水と同様に粒子に離散化

剛体に作用する外力を計算

剛体の並進・回転速度の算出

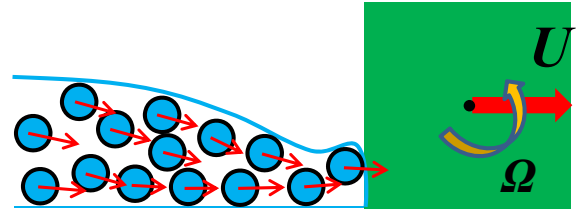


粒子離散化
剛体に作用する外力を計算

剛体粒子の速度の更新

$$\mathbf{u}_k^{n+1} = \mathbf{U} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_k$$

並進速度 回転速度



概念図

$$M \frac{d\mathbf{U}}{dt} = M\mathbf{g} + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_e$$

$$I \frac{d\mathbf{\Omega}}{dt} + \mathbf{\Omega} \times I\mathbf{\Omega} = \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_e$$

剛体移動の扱い方(2/2)

並進運動に関する方程式

$$M \frac{d\mathbf{U}}{dt} = M\mathbf{g} + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_e$$

$$\mathbf{F}_f = \sum_i \text{on the surface } P_i \Delta S_i \mathbf{n}_i$$

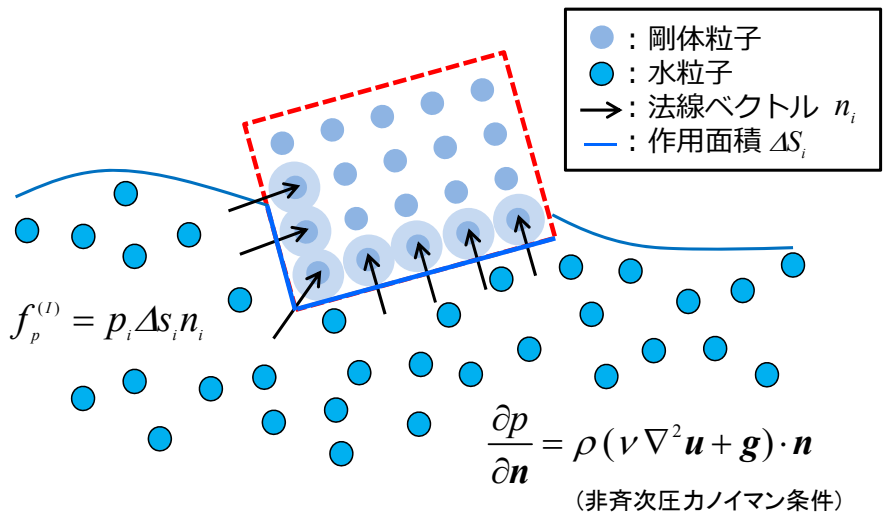
$$\mathbf{F}_e = \sum_i \text{on the surface } k \delta_i^{3/2}$$

ヘルツの弾性体接触理論

$$\begin{cases} \delta = r - l \\ k = \frac{4\sqrt{r}}{3} \frac{E_i E_j}{(1-\nu_i^2)E_j + (1-\nu_j^2)E_i} \end{cases}$$

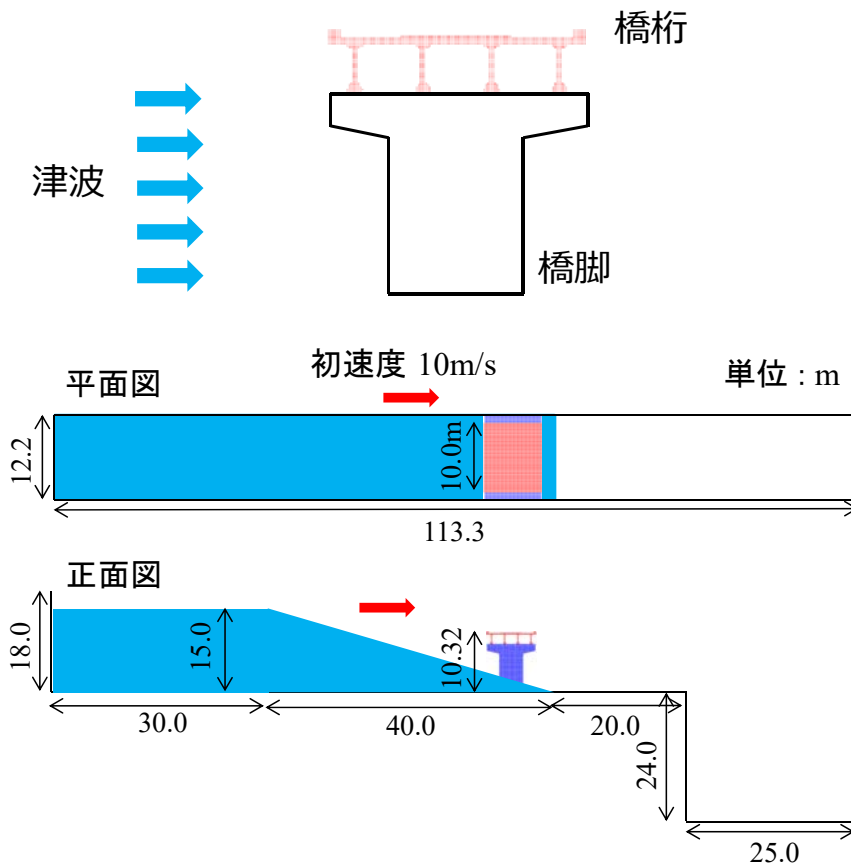
並進速度の更新

$$\mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{U}^n + \Delta t \left(\mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_f}{M} + \frac{\mathbf{F}_e}{M} \right)$$



- \mathbf{F}_f : 剛体に作用する流体力
- \mathbf{F}_e : その他の外力(接触力)
- P_i : 剛体の表面に作用する流体圧
- ΔS_i : 剛体の表面積
- $U|$: 並進速度
- $E_{i,j}$: ヤング係数
- δ : 境界面と粒子との距離
- r : 粒子間隔

解析モデル

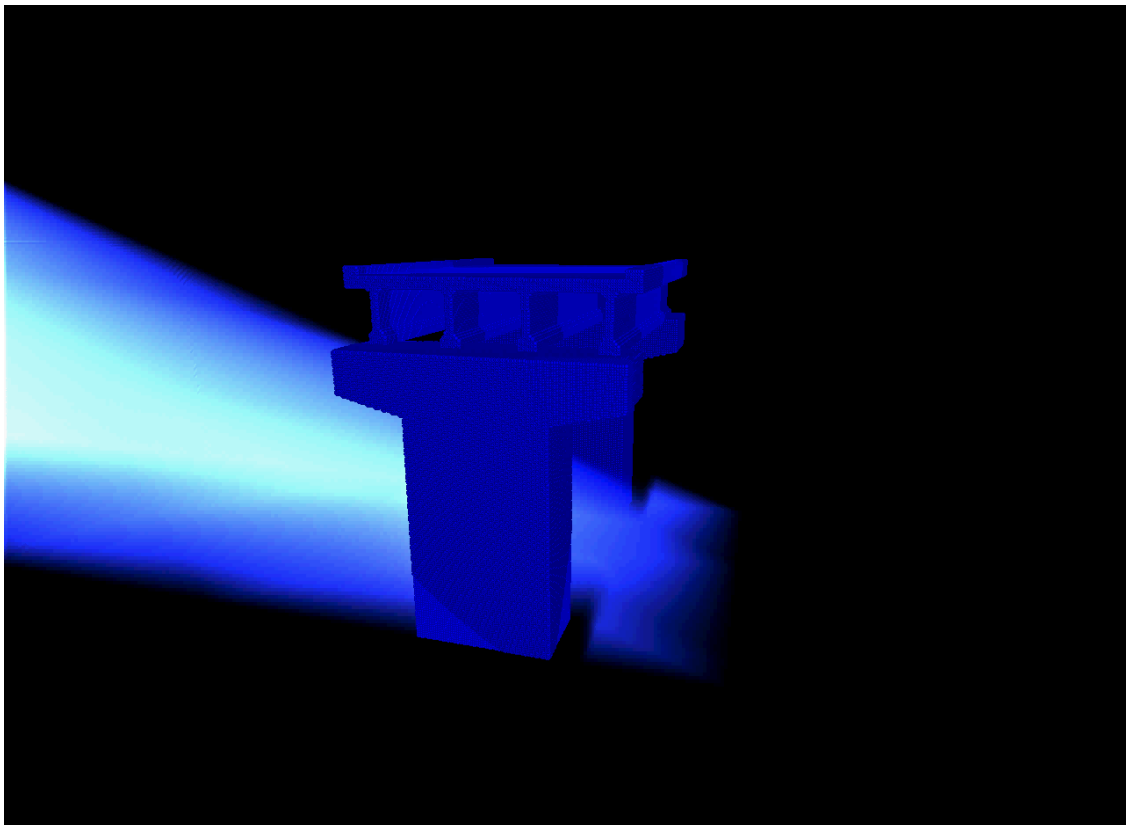


15

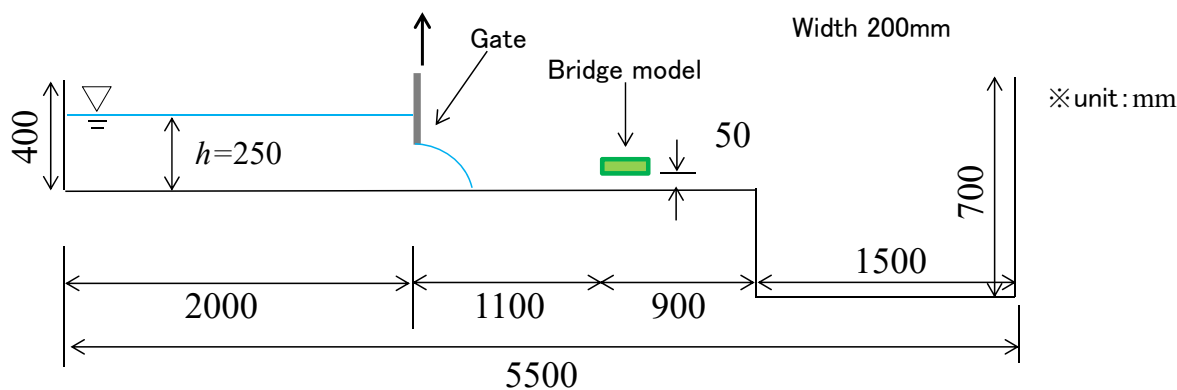
橋桁流失解析(流体剛体連成)

解析条件

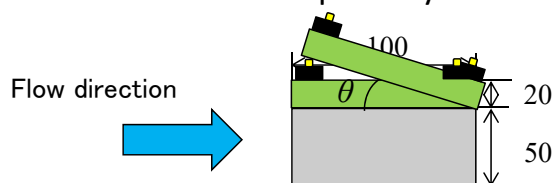
粒子間距離	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間 (500node=8000コア)
6cm	55 million	0.001s	3s	7h



橋梁流出シミュレーションのための妥当性確認



3D motion capture system



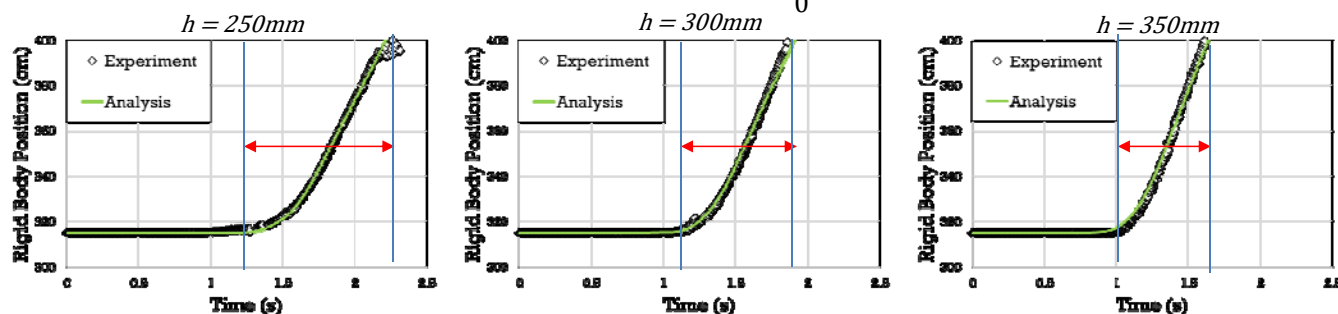
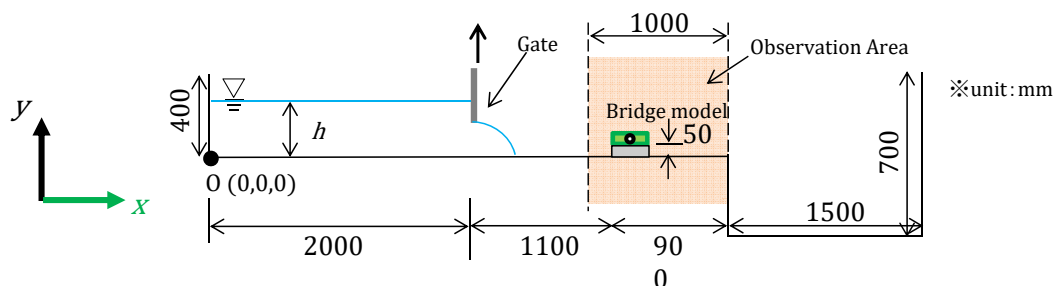
Simulation condition

Size of particle	Number of particles	Time increment	Real time	Simulation times
0.25cm	14 millions	0.0005sec	1.6sec	72hours

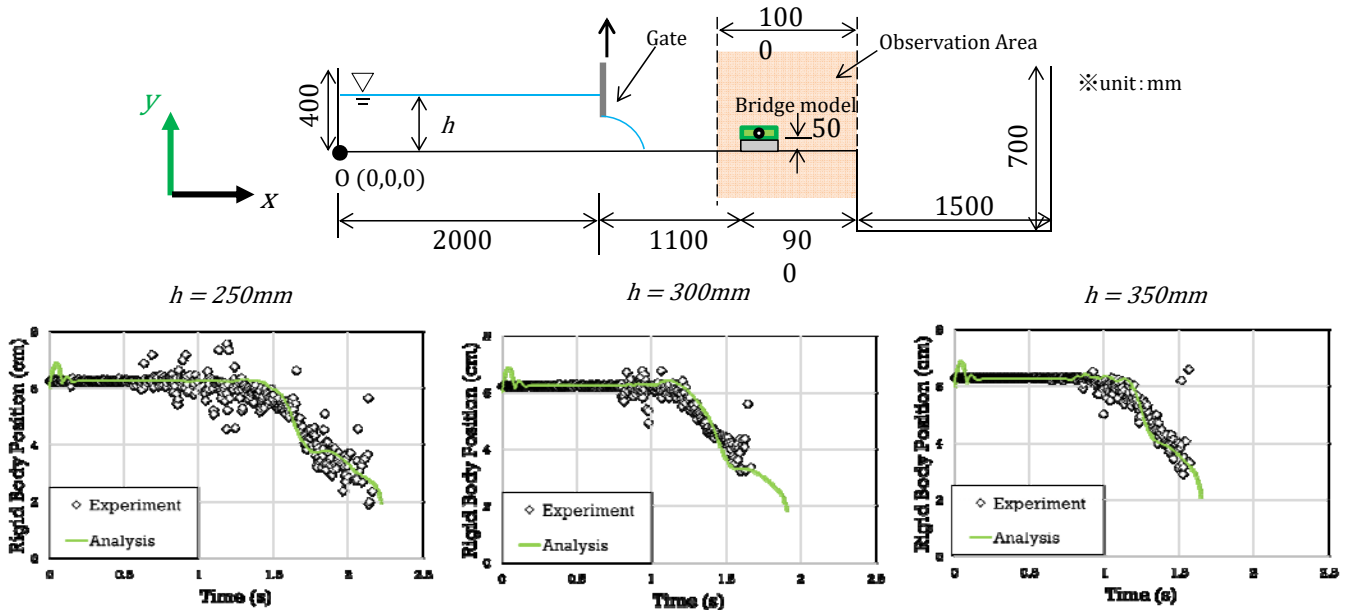
実験協力:立命館大学・伊津野和行教授,筑波大学・磯部大吾郎教授

18

重心位置の移動量の比較(水平方向)



重心位置の移動量の比較(鉛直方向)

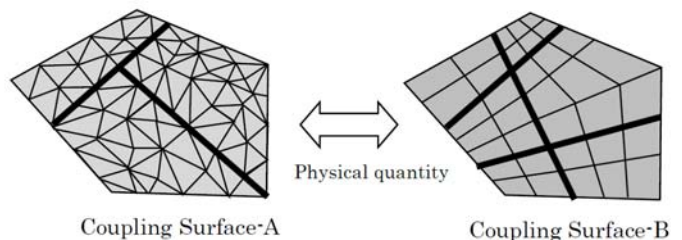


Structural Analysis Laboratory, Kyushu University

22

REVOCAP_Couplerによる粒子法コードとFEMコードの結合

- 昨年度までの連成解析システム
 - 片方向(流体→構造)の弱連成解析
 - 独自カプラーによるソフトウェア結合
- 今年度開発した連成解析システム
 - 双方向(流体↔構造)の弱連成解析システム
 - カプラーはREVOCAP_Coupler*を採用
 - 問題点1
 - 格子型解法同士を結合するカプラーなので、粒子法コードは使えない
 - 粒子法側の連成境界面に仮要素情報を構築することで解決
 - 問題点2
 - 粒子法プログラム, FEMプログラム, カプラープログラムそれぞれに異なるMPIプロセスが必要 (スパコン利用に適合しにくい)



異なるメッシュ間の補間(REVOCAP_Couplerマニュアル)

まとめ

- SPHコードのV&Vを実施
 - 流体解析のV&Vとして, 橋梁への津波衝突を想定した実験を行い, 精度良い結果が得られることが分かった
 - 流体剛体連成解析のV&Vとして, 橋桁喪失を想定した実験を行い, 精度良い結果が得られていることが分かった
 - SPH-FEM連成解析に向けてSPH法コードの整備はほぼ完了
- SPH-FEM連成解析システムを開発
 - 格子型解法向けカップラーであるREVOCAP_Couplerを応用し, 粒子法コードとFEMコードを結合させたシステムを開発した
- 今後の予定
 - 開発システムによる流体構造連成解析システムを実施