

# 津波襲来時における海底地盤の変形に起因した防波堤の不安定化

## Unstabilization of breakwater that originates in transformation of marine soil when tsunami raids

今瀬達也<sup>1</sup>, 前田健一<sup>2</sup>, 三宅達夫<sup>3</sup>, 鶴ヶ崎和博<sup>3</sup>, 澤田豊<sup>3</sup>, 角田紘子<sup>3</sup>

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・cig18505@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・都市社会工学科

3 東洋建設 鳴尾研究所

### 概要

過去に発生した津波による海岸構造物の被害について、構造物直下および周辺地盤の変形が被害の一要因であると考えられる。よって、これらの相互作用に着目した被害予測は極めて重要であり、海岸構造物の設計・管理を行う上でも大きな役割を果たす。そこで本研究では、地盤の変形メカニズムに着目した津波実験装置および数値解析手法の開発に取り組んでいる。実験では、遠心力载荷装置を用いた実験手法を開発し、実験を実施した結果、津波襲来時に地盤が不安定な状態になることが分かった。数値解析では、SPH法を用いた流体-構造物-地盤の連成解析の確立を目指しており、現在までに benchmark test である Dam break Problem に着手し、流体挙動を精度よく再現できることを確認した。さらに、海岸構造物を含む津波流動場のモデル化において、構造物に作用する津波の越流現象や波圧の再現が可能であることが分かった。

キーワード：津波防災，遠心模型実験，Smoothed Particle Hydrodynamics Method，数値波動水路

## 1. はじめに

過去幾多に渡り発生する津波は、多くの人命を奪い、物的損害を発生させてきた。我が国においても、被害が甚大であり、被害を最小限に抑える津波対策は急務である。過去に発生した被害報告を見ると、海岸域における防波堤や岸壁の被害が著しく、その被災により津波の威力が抑制されず、沿岸域を遡上した津波で家屋などの被害が生じたケースなどが記されている。そのため、過去には津波力に対する海岸構造物の安全性に着目した、流体と構造物の相互作用に関する水理実験が多く行われてきた。

しかし、1993年の北海道南西地震で生じた津波被害の報告<sup>1)</sup>では、防波堤などの海岸構造物の被害は、防波堤直下の捨石マウンドや地盤が津波力の作用により不安定な状態に至ったことに起因すると指摘している。そこで、本研究では破壊メカニズムの解明を目的とし、津波襲来時における海底地盤等の変形に着目した防波堤の安定性評価について遠心模型実験による実験的現象解明と Smoothed particle Hydrodynamics Method (以下、SPH法と称す。)による数値解析的現象解明を東洋建設(株)鳴尾研究所と共同研究で試みた。また、遠心実験と SPH法による流体挙動の妥当性を検証する目的と地盤内の動水勾配変動を把握する目的として、本研究では差分解法である数値波動水路(沿岸開発センター開発)<sup>2)</sup>を用いた。

## 2. 遠心模型実験

### 2.1 実験概要

本研究において用いる実験装置は、東洋建設(株)鳴尾研究所が所有するドラム型遠心力载荷装置<sup>3)</sup>である。実験装置の諸元を表1に示す。本装置は、ビーム型遠心力载荷装置と比べて実験領域が広域であることから、津波などの流体現象が再現可能である。さらに実験領域内に海岸構造物を模擬した相似模型を設置することで、流体力に伴う構造物の被害予測の検討が可能となる。

本実験では、実験領域を図1に示すように貯水エリアと模型エリアの2つに分け、その境にシャッター式ゲート板を設けている。実験開始前はゲート板を隔てて両エリアに水位差をつける。そして、装置を所要の遠心加速度に達するまで回転数を上げ、幾何学的・力学的相似則を満足させた遠心場を再現したのちに、ゲートを急開することで段波津波を発生させて海岸構造物の変形特性を観察している。

表1 実験装置の諸元<sup>3)</sup>

最大加速度	440G (600rpm)	
容器寸法	模型	実物換算(最大加速度時)
直径	2.2 m	3041 m
幅	0.3 m	132 m
水深	0.3 m	132 m (内、地盤 32 m)
最大搭載荷重	3.7 ton	1628g-ton

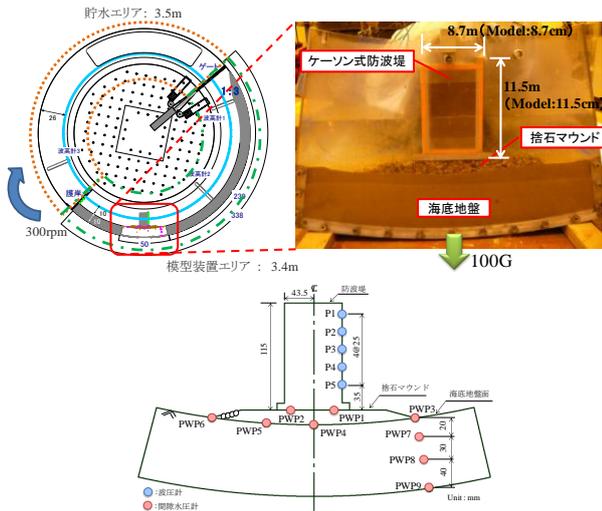


図1 実験装置の概略図と計測機器の配置

実験模型について説明する。実験に用いる材料は、海底地盤に豊浦標準砂、捨石マウンドに礫材、防波堤にはアルミで制作した模型を用いている。海底地盤においては、遠心場における透水時間の相似則を満足させるため粘性流体で飽和させており、相対密度  $Dr=40\%$  となるように仕上っている。実験時の計測は装置内に波高計の設置、防波堤に圧力計を設置することで津波力の計測を行っている。また、地盤内に間隙水圧計を設置し、地盤の状態変化について調べている。さらに、小型高速度カメラを用いて実験時の様子を撮影し観察している<sup>4)</sup>。

## 2.2 実験結果

本稿では、重力場換算において初期水位差 2m の段波津波を発生させた実験ケースについて示す。

### 2.2.1 流体力の検証

実験で観測した波高の経時変化を図 2 に示す。CH1 はシャッターゲート付近、CH2 は実験エリア中央に設置した計測器を示しており、数値波動水路との比較を行っている。

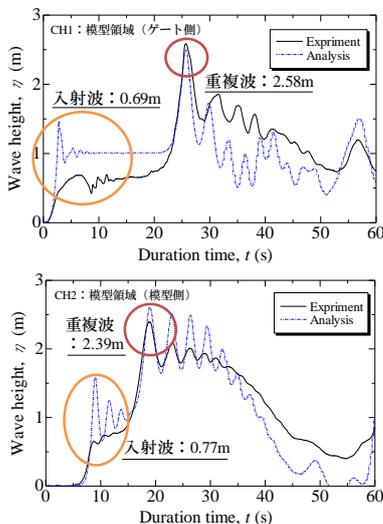


図2 津波の波高変化 (上: CH1, 下: CH2)

CH1 では、入射波について解析結果の方が波高が高く、初期に急激な上昇がみられる。実験で見られないのは、Dam break をする際に、瞬時にゲートがなくなる解析とは異なり、実験ではゲート板の開く速度に依存した水柱の崩壊が起きるためであると考えられる。重複波については、ほぼ同等の波高が同時刻に到達している。CH2 では、CH1 と同様の結果が得られる。しかし、実験結果と解析結果の波の周期はほぼ一致していることが分かる。

次に、防波堤に作用する波圧について比較する。図 3 に示す結果は、実験時に防波堤に設置した波圧計の値と数値波動水路によって求めた値について比較したものである。

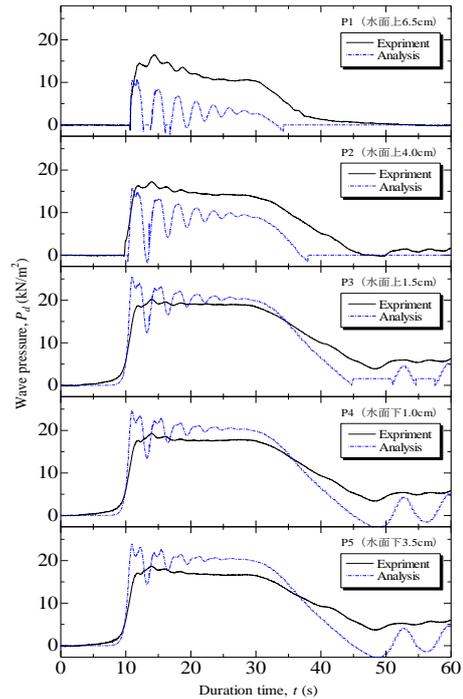


図3 防波堤に作用する波圧の経時変化

静水面（初期水面）付近より以深において、実験値は解析値とほぼ同等か若干低い値を示しており、初期の急激な上昇はみられない。また、それより高い位置の圧力変動においては実験値の方が高い値になっている。これらの要因として、先述した水柱の崩壊の違いにより水塊の移動量や移動時間が若干異なったためと考える。

実験結果をもとに、従来から指標とされている谷本ら<sup>5)</sup>による波圧算定式：式 (1) と比較した。

- ・最大作用波圧

(指標式)

$$P_p = 2.4 \rho g a_i \quad (1)$$

(実験結果より得られた算定式)

$$P_p = 2.8 \rho g a_i \quad (2)$$

ここで、 $\rho$  : 流体密度、 $g$  : 重力加速度、 $a_i$  : 平均入射波高である。ただし、実験時の平均入射波高は波高計データより、0.71[m]としている。この結果、実験結果が指標式の 1~2 割増程度であり、従来の知見とほぼ同等であることがわかった。

## 2.2.2 流体力に対する防波堤の安定性検証

図4に津波襲来時の海岸構造物周辺の経時変化について示す。

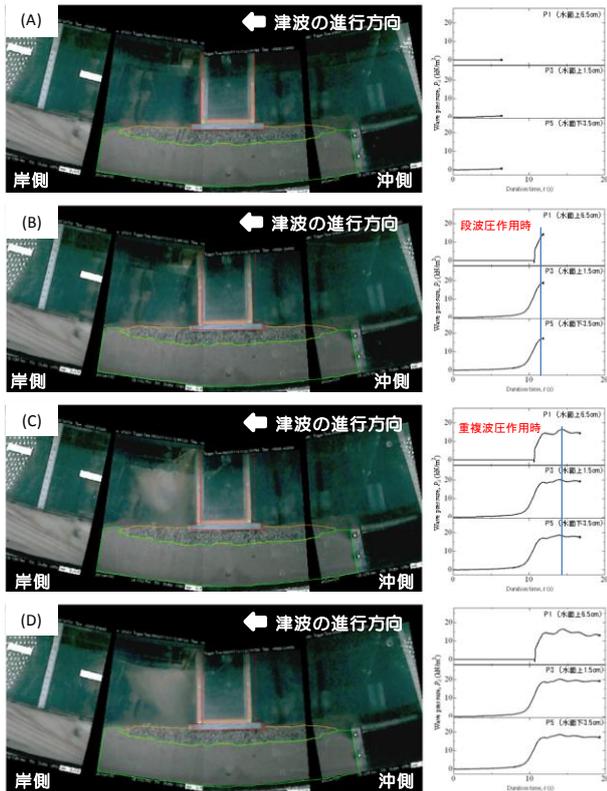


図4 津波襲来時における海岸構造物の変形(A)-(D)

防波堤に作用した波圧変化と海岸構造物の変形挙動を比較すると、波圧が作用した時点から最大段波圧が作用するまでに防波堤の滑動が確認された(図4(A)-(B))。さらに、滑動と同時に防波堤直下から後方においてマウンドおよび海底地盤にせん断変形が発生していることを確認した。その後、最大重複波圧が作用する際、マウンドおよび海底地盤の噴石・填砂が生じた(図4(C)-(D))。そこで、現行の設計指針に従い、海岸構造物に対して、滑動・転倒・支持力に対する安全率を算出し検討した。本節では、防波堤に対する滑動・転倒について検討した<sup>6)</sup>。

・滑動に対する検討

$$f_d(W_d - P_{B_d} - P_{U_d}) \geq P_{H_d} \quad (3)$$

・転倒に対する検討

$$a_1W_d - a_2P_{B_d} - a_3P_{U_d} \geq a_4P_{H_d} \quad (4)$$

ここに、 $f_d$  : 壁体底面と基礎の摩擦係数、 $W_d$  : 堤体の重量[kN/m]、 $P_{B_d}$  : 浮力[kN/m]、 $P_{U_d}$  : 揚圧力[kN/m]、 $P_{H_d}$  : 水平波力[kN/m]、 $a_1 \sim a_4$  : 各作用のアーム長[m]を示す。

安全率を算出した結果、滑動に対する安全率が0.6程度および転倒に対する安全率が0.7程度と、通常基準とされている滑動及び転倒に対する安全率1.2を大きく下回っている。大変形は生じなかったものの、安全率からも、構造物が不安定な状態にあることがわかった。

## 2.2.3 地盤の安定性検証

まず、段波圧によって生じたせん断変形について支持力の安全率を算出した。地盤の変形挙動を把握するため、粒子画像速度測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)を用いて速度ベクトルを算定した。その後、算出された速度をもとにせん断ひずみに変換し(図5)、ひずみ分布をもとに、すべり線を決定した。

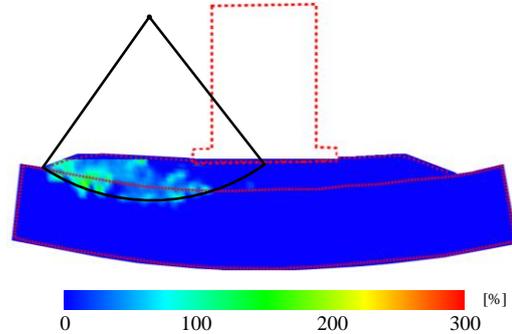


図5 せん断ひずみ分布

安全率の算出には、次式に示す簡易ビショップ式による円弧すべり解析を行った。

$$F_f = \frac{\sum \left\{ [c_d S + (W'_d + q_d) \tan \phi_d] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi_d} \right\}}{\sum \{ (W_d + q_d) \sin \theta + a P_{H_d} / R \}} \quad (5)$$

ここに、 $c_d$  : 見かけの粘着力[kN/m<sup>2</sup>]、 $S$  : 分割片の幅[m]、 $W'_d$  : 単位長さ当たりの分割片の有効重量[kN/m]、 $q_d$  : 分割片上部からの鉛直荷重[kN/m]、 $\phi_d$  : 内部摩擦角[°]、 $\theta$  : 分割片底面が水平面となす角度[°]、 $W_d$  : 単位長さ当たりの分割片の全重量[kN/m]、 $a$  :  $P_{H_d}$ の作用位置の円弧滑りの滑り円中心からの距離[m]、 $P_{H_d}$  : 円弧滑りの滑り円内の土塊への水平作用力[kN/m]、 $R$  : 円弧滑り円の半径[m]である。本計算においては、見かけの粘着力はないものとしている。

安全率を算出した結果0.88となり、通常考えられている安全率1.0を下回り、地盤が不安定であることがわかった。ここで、通常円弧すべりではすべり線上にひずみが卓越すると考えられているが、今回はすべり土塊内においても、速度差が生じており、ひずみが発生している。よって、今後は土塊内部におけるせん断変形についても考える必要がある。

次に、重複波圧が作用した際に生じた地盤の填砂および捨石マウンド噴石について考察する。地盤内に設置した間

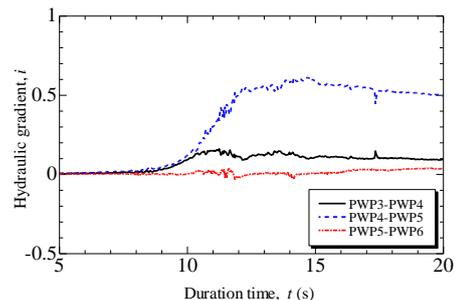


図6 地盤表層における動水勾配の経時変化

隙水圧計により計測した圧力をもとに、地盤内の動水勾配の変化について算出した。図6に動水勾配の経時変化を示す。地盤表層では最大重複波圧が作用した際、PWP4～PWP5間の動水勾配が0.7付近まで上昇していることがわかる。この結果について、鉛直下向き1次元流れ限界動水勾配と比較を行った。

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (6)$$

ここに、 $G_s$  : 土の比重 (=2.65),  $e$  : 間隙比 (=0.8538) である。このとき限界動水勾配  $i_{cr} = 0.893$  となり、実験値が限界動水勾配に近いことから、地盤が不安定な状態であるといえる。その状態下において、流速の早い流体がマウンド内を通過することにより、表層地盤の墳砂および捨石マウンドの噴石が発生したものと考える。

### 3. 差分解析法による検証

#### 3.1 解析手法の概要

本研究で用いる差分解析法の数値波動水路とは、従来の2次元造波水路の模型実験に変わりうる解析手法とされており、海域施設の耐波設計への適用を目的として設立された「数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会」で開発された。海岸工学分野では流体挙動を検証するためによく用いられており、信頼精度が高いと考える。

本手法は、2次元非圧縮流体粘性流体を対象とした連続式と Navier-Stokes 方程式が採用されている<sup>2)</sup>。

・連続式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (7)$$

・運動方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_w g \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $t$  : 時間,  $u$ ,  $w$  : 水平, 垂直方向の流速成分,  $\rho$  : 密度,  $p$  : 圧力,  $\nu_e$  : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和,  $g$  : 重力加速度,  $\gamma_v$  : 空隙率,  $\gamma_x$ ,  $\gamma_z$  : 水平, 鉛直方向の面積透過率である。数値解法では、スタガード格子を採用し、空間方向の離散には2次精度中心差分による解法、時間方向の離散には Euler 法を基とし、連続の式と運動方程式の連成に SMAC (Simplified Marker and Cell) 法が用いられている。また、自由表面解析モデルとして VOF (Volume of Fluid) 法が用いられている。さらに、数値計算上の安定性の問題から、時間刻み幅は CFL 条件を満足させている。以下、詳細については参考文献 2) を参照されたい。

### 3.2 海底地盤の不安定化検証

#### 3.2.1 海底地盤の設定

数値波動水路では、捨石マウンドなどの透水性構造物をポーラス・メディア法テーブルという機能を用いて設定している。通常海岸域における検証をする場合、地盤までは再現することはしない。しかし、本研究では海底地盤についても透水性構造物で模擬することとし、ポーラス・メディア法テーブルを用いて地盤を形成し、津波が襲来した際の地盤の応答について検討した。特に本稿では、海底地盤の動水勾配の変動について着目する。

ポーラス・メディア法テーブルを用いて構造物を設定する際に、水の割合、慣性力係数、抵抗係数の3つのパラメータを設定する必要がある。水の割合については、遠心実験と合わせるため、相対密度  $Dr = 40\%$  の豊浦砂 (間隙比  $e = 0.8538$ ) を用いて  $wG_s = eS_r$  より 0.3 とした。ただし、飽和度  $S_r = 1$ , 土粒子の単位体積重量  $G_s = 2.656$  としている。また、慣性力係数および抵抗係数に関しては、もともとなる値がなく、パラメータの設定において不明確であることから、数値波動水路を用いて疑似的な透水試験を模擬して行い、地盤として適応できる透水係数となるよう図7に示すフローチャートの手順でパラメータを設定した。

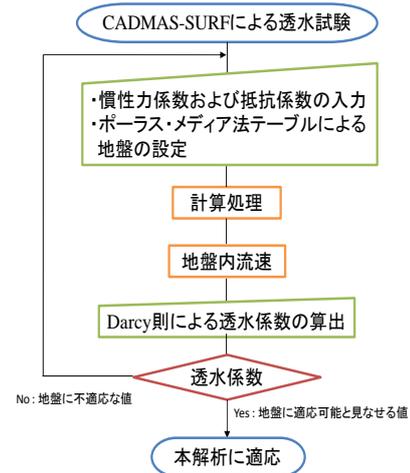


図7 透水係数算出に関するフローチャート

透水試験の結果、慣性力係数 2500.0, 抵抗係数 10000.0 のとき、透水係数  $7.0 \times 10^{-2}$  [cm/s] となり、本解析ではこの値を海底地盤のパラメータとして用いることにした。また、このときのレイノルズ数は  $Re = 0.2427$  であり、層流領域にあることから、透水係数は Darcy 則に従うものと考えて算出している。ただし、レイノルズ数を算定する際に用いた値は、流速が  $v = 0.0513$  [m/s], 水の粘性係数が  $\eta = 1.004 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s], 材料の代表径が  $D = 4.75$  [mm] (粗砂) とである。

#### 3.2.2 解析モデル

図8に、海岸構造物を含む津波流動場のモデル化を示す。メッシュ間隔は地盤域では x 方向に 0.1[m], z 方向に 0.1[m] で設定し、それ以外では x 方向に 1.0[m], z 方向に 1.0[m] で設定している。防波堤は、不透水性構造物で設け、捨石

マウンドと地盤は透水性構造物を設けている。ただし、地盤は前節で求めた値を用い、捨石マウンドにおいては、水の割合 0.48、慣性力係数 1.2、抵抗係数 1.0 としている。

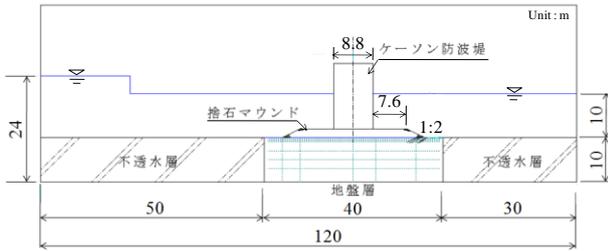


図8 海岸構造物を含む津波流動場のモデル化

### 3.2.3 解析結果

図9に、津波が襲来した際に生じた地盤の動水勾配の経時変化について示す。

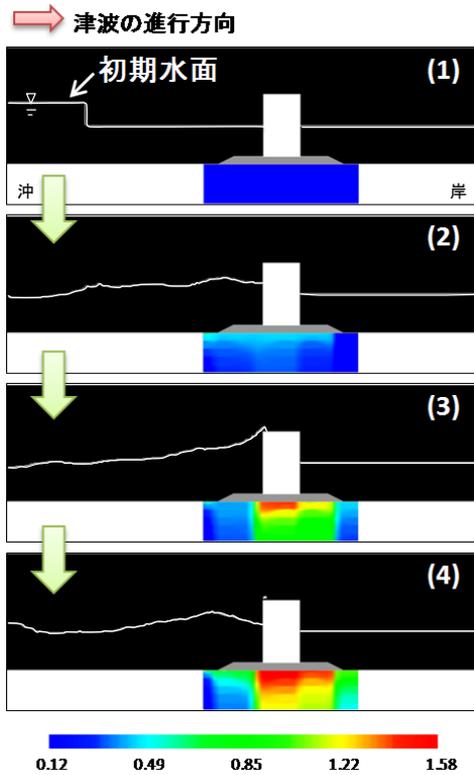


図9 津波襲来時における動水勾配の変化

解析の結果、津波が防波堤付近まで襲来した際（図9-（2））、海底地盤表層部において全体的に値が上がっている。その後、津波が防波堤に作用した際（図9-（3））、防波堤直下より後方において動水勾配の急激な上昇がみられ、表層付近においては局所的に値が高くなる箇所がある。また、波が引く際においても（図9-（4））、地盤表面が広域に渡り、動水勾配が高くなることがわかった。特に、防波堤直下から後方（岸側）においては依然、動水勾配が高い状態が続いている。よって、津波力が防波堤に作用し、後退する一連の状態において、地盤の表層付近では地盤が常に不安定な状態にあるといえる。これは、先述した遠心実験でも同様のことが言え、定性的に近い結果を得ている。

## 4. SPH法を用いた解析手法の開発

### 4.1 SPH法による物理量の算定

SPH法は、Lucy<sup>7)</sup>やMonaghan<sup>8)</sup>により宇宙物理の分野で開発された手法である。特徴として、個別要素法（以下、DEMと称す。）のように粒子個々に着目して運動方程式を解くのではなく、図10に示すように実粒子の集合体（半径  $h$  とした円形）である連続体素片に着目して計算を行う。

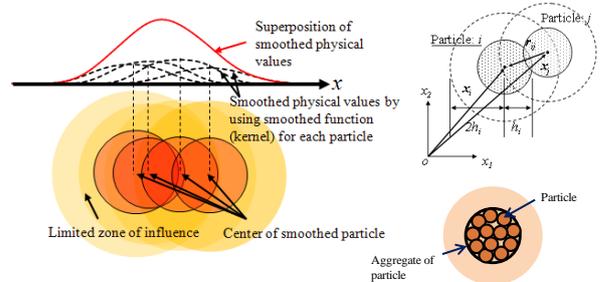


図10 SPH法による平均化関数を用いた物理量の表現

解析領域は粒子素片の重なり合いによって表現され、粒子素片に対して運動方程式を時間差分で解く。そのため、大領域を対象とした粒子数が多くなる系の解析において、DEMより比較的容易に計算が可能である。さらに、粒子素片はLagrange的に取り扱うため、粒子素片同士の剥離、亀裂、流動などの破壊モードや多相系の混合問題、相互作用問題といったDiscreteな挙動を表現することが可能である。また、粒子素片の運動は、周囲の粒子素片から受ける応力勾配により支配される。応力-ひずみ関係については、有限要素法などの連続体解析と同様、状態方程式や構成式を導入することで導かれる。よって、本手法はDiscreteな解析手法と連続体解析の両特徴を持ち合わせた解析手法である<sup>9)</sup>。

#### 4.1.1 Kernel近似

SPH法では着目する相を複数の粒子素片が集合し、重なり合うことで近似的な場を表現している。つまり、位置ベクトルで表わされる任意の点  $\mathbf{x}$  における物理量  $f(\mathbf{x})$  の空間平均値  $\langle f(\mathbf{x}) \rangle$  は、影響範囲内にある粒子素片  $\mathbf{x}'$  の物理量  $f(\mathbf{x}')$  を平均化関数（Smoothing Function）によって内挿することで以下のように表現する<sup>9)-10)</sup>。

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (10)$$

また、平均化関数  $W$  は、次の性質を有する必要がある。

- 1) 正規化されている

$$\int W(x, h) dx = 1 \quad (11)$$

- 2) 平均化関数の極限がデルタ関数である

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x - x', h) = \delta(x - x') \quad (12)$$

- 3) コンパクト化が可能である

$$W(x, h) = 0 \quad \text{for } |x| \geq h \quad (13)$$

ここで、任意の点  $\mathbf{x}$  における密度を  $\rho(\mathbf{x})$  とすると、式(10)は以下のように書き換えられる。

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int \frac{f(\mathbf{x}')}{\rho(\mathbf{x}')} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) \rho(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (14)$$

さらに、この関数の空間微分について次式のように書き記すことができる。

$$\nabla \langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int \frac{f(\mathbf{x}')}{\rho(\mathbf{x}')} \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) \rho(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (15)$$

ここで、 $\nabla$  : 微分演算子 gradient である。

次に、式 (14) および式 (15) について有限個の粒子素片に離散化することを考えると、次式のように近似することができる。

$$f_i = \langle f_i \rangle = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (16)$$

$$\nabla f_i = \nabla \langle f_i \rangle = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} \nabla W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (17)$$

ここに、中心に存在する素片粒子  $i$  の位置、質量、密度を  $\mathbf{x}_i$ ,  $m_i$ ,  $\rho_i$  とする。

#### 4.1.2 平均化関数

先述したように、SPH 法では平均化関数を用いて、影響範囲内にある粒子素片の物理量から対象とする中心位置の評価点として内挿する。そのため、近似精度は平均化関数の精度に大きく起因する。現在までに Gauss 分布を始めとして多数の関数が提案されている<sup>10)</sup>。本研究においては、関数が滑らかでかつ影響範囲が大きくなることを考慮して、次の 3 次 B-Spline 関数を用いた。

$$W_{ij} = \alpha_s \times \begin{cases} \frac{2}{3} - S^2 + \frac{1}{2} S^3 & (0 \leq S < 1) \\ \frac{1}{6} (2 - S)^3 & (1 \leq S < 2) \\ 0 & (2 \leq S) \end{cases} \quad (18)$$

ここに、 $S = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| / h_{ij}$  である。また、 $\alpha$  は平均化関数の性質を満たすように決定される係数で、1, 2, 3 次元でそれぞれ  $1/h$ ,  $15/7\pi h^2$ ,  $3/2\pi h^3$  となる。

## 4.2 連続の式および運動方程式の SPH 表記

### 4.2.1 連続の式

SPH 法は Lagrange 的計算アルゴリズムであるため、系に存在する粒子素片の質量の総和が増減しない限り、系の連続条件が満たされることとなる。ここでは、粒子素片の密度算定式について記述する。

粒子素片  $i$  の密度  $\rho_i$  として、式 (16) の  $f_i$  を  $\rho_i$  に置き換えるとすぐに計算できる。

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\rho_j}{\rho_j} W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (19)$$

密度や状態方程式が大きく異なる物質の境界付近や自由境界付近においては、算定される密度に大きな誤差が生じる。そこで、次式のように同一物質のみ (例えば物質  $a$ ) で密度算定を行うことで、以上の問題を解決することが可能となる<sup>9)</sup>。

$$\rho_{i \in \text{Material } a} = \frac{\sum_{j \in \text{Material } a} m_j W_{ij}}{\sum_{j \in \text{Material } a} \left( \frac{m_j}{\rho_j} \right) W_{ij}} \quad \text{for Material } a \quad (20)$$

また、提案されている連続の式の微分形について、次式に示す<sup>10)</sup>。

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \cdot \nabla_i W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad (21)$$

ここに、 $\nabla_i$  は粒子素片  $i$  の座標に関する微分演算子である。

### 4.2.1 運動方程式

Lagrange 的解法による運動方程式は、応力テンソル  $\boldsymbol{\sigma}$ 、体積力ベクトル  $\mathbf{f}$  を用いて、一般に以下のように記す。

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} \quad (22)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$  の等方圧縮応力成分、偏差応力成分をそれぞれ  $p$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  とすると、

$$\boldsymbol{\sigma} = p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} \quad (23)$$

となる。ただし、 $\mathbf{I}$  : 単位行列である。

式 (22) について SPH 法表記すると以下ようになる。

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} \right) \cdot \nabla W_{ij} + \mathbf{f}_i \quad (24)$$

また、流体の粘性項および固体の人工粘性をそれぞれ Morris と Monaghan-Gingold の方法を用いると式 (25)、式 (26) のように表示することができる。

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} \right) \nabla W_{ij} + \sum_{j=1}^N \frac{m_j (\mu_j + \mu_i) \nu_{ij}}{\rho_j \rho_i} \left( \frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \right) + \mathbf{f}_i \quad (25)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \mathbf{I} \right) \cdot \nabla W_{ij} + \mathbf{f}_i \quad (26)$$

ここに、 $\mu$  : 粘性係数、 $r_{ij} = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$  である。また、 $\Pi_{ij}$  : 人工粘性として与える。

## 4.3 土固体相と流体相の相互作用

本研究では、SPH 法において相変化を表現するため、土からなる固体相と、水および空気の流体からなる流体相を個々のレイヤ上で計算し、それらを重ね合わせることで二相または三相系の連成解析を可能としている (図 11)。重ね合わせをする際、両者間に空隙率  $n$  と透水 (透気) 係数  $k$  を考慮した以下の物体力  $\mathbf{f}$  を作用させる。この物体力は、両相の速度差により生じる摩擦力に起因する力と考え、Biot の方法<sup>11)</sup> にならって次のように定義する。

$$\mathbf{f}^s = n \frac{\rho_f g}{k} (\mathbf{v}^f - \mathbf{v}^s), \quad \mathbf{f}^f = n \frac{\rho_s g}{k} (\mathbf{v}^f - \mathbf{v}^s) \quad (27)$$

ここで、 $\mathbf{v}^s$ ,  $\mathbf{v}^f$  は固体相および流体相上の粒子素片の流速ベクトル、 $\rho^f$  は流体の密度である。

また、作用反作用の関係から、

$$\mathbf{f}^s = -\mathbf{f}^f \quad (28)$$

が成立する。

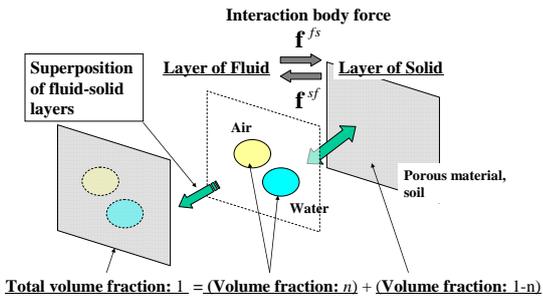


図11 固体相と流体相の重ね合わせと相互作用

#### 4.4 解析結果

##### 4.4.1 2D-Dam break 問題による流体挙動の検証

SPH 法における 2 次元の解析精度を検証する。本研究では、流体挙動の妥当性を検証する目的で、Benchmark Test である Dam break 問題を取り上げ、実験結果による指標<sup>12)</sup>と比較を行った。比較に際して、密度算定式を正規化により算出する式 (20) と連続の式の微分形である式 (21) を用いて計算した。運動方程式は Morris 粘性による式 (25) で統一している。さらに、SPH 法では流体の疑似的圧縮性を非圧縮流体に適合しているため、下記に示す人工圧縮率 (XSPH) を導入することで速度修正を行っており、補正パラメータによる挙動の違いについても検討した。

$$v_i = v_i' - \varepsilon_{XSPH} \sum_{j=1}^N m_j (v_i' - v_j') W_{ij} \quad (29)$$

ここで、 $v$ ,  $v'$  は修正後と修正前の速度、 $\varepsilon_{XSPH}$  は補正パラメータである。通常、流体では  $\varepsilon_{XSPH}$  を 0.5 とされている。本稿では、0.1 と 0.5 のパラメータを用い、挙動の違いについて検証した。

図 12 に、実験および解析による Dam break 時の先端粒子の位置変化について比較を示す。

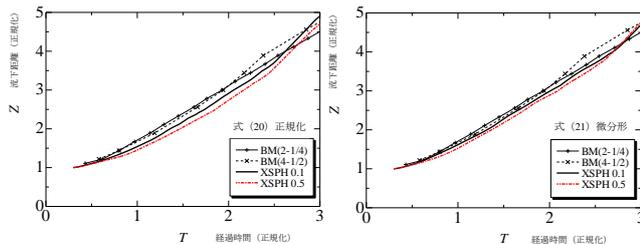


図12 Benchmark Test における実験と解析の比較  
(左: 正規化, 右: 連続の式の微分形)

図中の凡例 BM は実験による結果である。比較の結果、密度算定式は連続の式の微分形がより実験結果と近い結果を得ている。また、XSPH に関しては、パラメータによる大きな違いはあまり見ることができないが、0.1 の方が実験結果に近いことがわかった。

##### 4.4.2 海岸構造物に作用する津波流の再現と検証

Benchmark Test の結果より、本節では、密度算定式に連続の式の微分形を用い、XSPH を 0.1 として、図 13 に示す海岸構造物を模擬した解析領域を設けて、防波堤および捨石マウンドに津波力を作用させた。本ケースでは素片半径

0.2[m], 初期水位差 3[m], 捨石マウンドの透水係数  $k=1.0 \times 10^4$  [cm/s] と設定している。ただし、防波堤および捨石マウンドは位置を不動として、変形しないものとしている。また、流動場の定性かつ定量的評価を行うため、先述した数値波動水路と比較検証を行った。数値波動水路においては、格子間隔を水平、垂直方向ともに 0.1[m] 間隔で設定している。

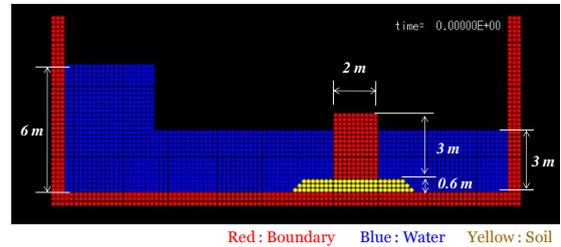


図13 SPH 法による海岸構造物を含む津波流動場の再現

図 14 に流体挙動の経時変化を示す。数値波動水路と比較した結果、水柱が崩壊する様子から防波堤を越波する現象まで忠実に再現できている。また、差分解析では表現できないような流体の渦流れやマウンド内を通過する流体挙動が可視化できている。

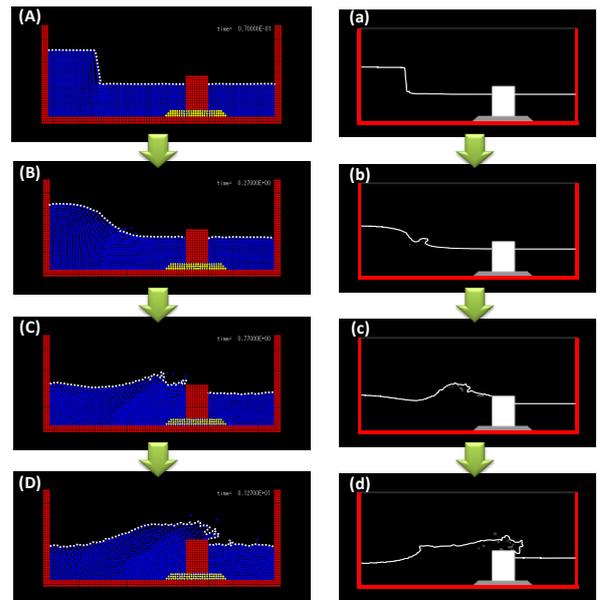


図14 SPH 法 (A-D) と数値波動水路 (a-d) の流体挙動比較

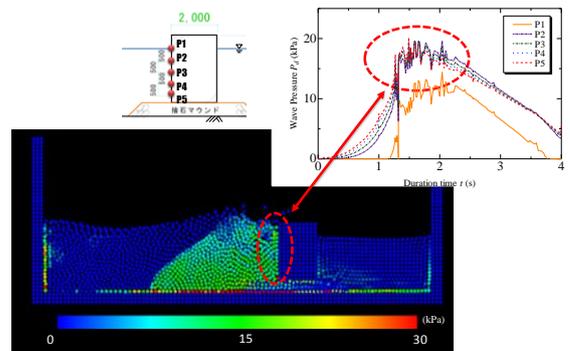


図15 防波堤に作用する波圧評価  
(図: SPH 法, グラフ: 数値波動水路)

さらに、定量的評価として、防波堤に作用する波圧について比較を行った結果(図15)、防波堤に作用する波圧については、両解析手法とも約15~20[kPa]の値を示している。よって、SPH法において定性的かつ定量的に、流体挙動が再現できていることがわかった。

#### 4.4.3 剛体運動モデルを導入した防波堤の挙動

前節で不動であった防波堤に対して、剛体運動モデル<sup>13)-14)</sup>を導入したコンクリート粒子で防波堤を形成し、流体力を作用させた。ただし、解析領域および解析条件は、4.4.2と同様であり、捨石マウンドの透水係数についてのみ $k=1.0 \times 10^1$ [cm/s]と $k=1.0 \times 10^2$ [cm/s]を用い、防波堤の挙動変化について考察した。図16(左)に捨石マウンドの透水係数 $k=1.0 \times 10^1$ [cm/s]について、(右)に透水係数 $k=1.0 \times 10^2$ [cm/s]についての防波堤の挙動を示す。図内の実線格子は1mピッチで、点線は補助線として0.5mごとに挿入している。

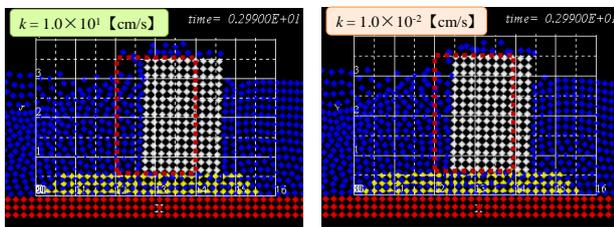


図16 津波力を受ける防波堤の変動  
(左:  $k=1.0 \times 10^1$ [cm/s], 右:  $k=1.0 \times 10^2$ [cm/s])

解析の結果、透水係数 $k=1.0 \times 10^1$ [cm/s]の場合は約0.7[m]の変動、透水係数 $k=1.0 \times 10^2$ [cm/s]の場合は約0.4[m]の変動となった。変動量の違いについて、防波堤に作用する水圧分布を調べたところ、透水係数の高い方が防波堤直下の圧力値が大きいことがわかった。このことから、マウンド内の透水係数が高いと防波堤に作用する揚圧力が高くなり、防波堤の変動量が大きくなると考える。

## 5. 結言

〈遠心実験〉

- ・段波圧が作用した際、防波堤の滑動・転倒に対する安全率は1.2を下回っており、実験時に防波堤の変動を確認した。しかし、大変形には至っていない。
- ・防波堤に段波圧が作用する際、地盤直下および後方(岸側)において、捨石マウンドおよび海底地盤の浅域で円弧状に変形しており、支持力に対する安全率は1.0を下回っていた。ひずみ分布を調べた結果、すべり線以外にもひずみが発生しており、円弧すべりとは異なる変形を示すことがわかった。
- ・重複波圧作用以降、捨石マウンドおよび海底地盤の噴出が確認された。このときの地盤表層の動水勾配は約0.7に近い値となり、地盤が流体力により不安定な状態になることが分かった。

〈数値波動水路〉

- ・地盤内の動水勾配の変化について考察した結果、防波堤

直下から後方(岸側)の表層地盤において動水勾配が高くなることがわかった。これは、遠心実験と比較して定性的に一致している。

〈SPH法〉

- ・Benchmark TestであるDam break問題において流体挙動を評価した結果、密度算定式において連続の式の微分形が、実験結果とより近い結果を示した。
- ・海岸構造物を含む津波流動場を再現し、流体挙動について数値波動水路と比較したところ、水柱の崩壊の様子や防波堤を越波する現象など定性的に評価できている。また、防波堤に作用する波圧を考察したところ、ほぼ同等の値を示しており、定量的にも一致していることがわかった。
- ・剛体運動モデルを導入した防波堤の挙動を、捨石マウンドの透水係数を変えて考察したところ、透水係数が高い方が、防波堤に作用する揚圧力が大きくなり、防波堤の変動を大きくさせることがわかった。

## 6. 謝辞

この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)20360210 および基盤研究(B)21360222の助成を受けており、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 稲富隆昌 他: 1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告港技研資料, No.791, pp.38-64, 1994.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発沿岸技術ライブラリー, No.12, 2001.
- 3) M. Miyake and T. Yanagihata: Heap shape of Materials Dumped from Hopper Barges by Drum Centrifuge, Proceedings of the Ninth International offshore and Polar Engineering, Vol.1, pp.745-748, 1999.
- 4) 三宅達夫 他: 津波を受けるケーソン式防波堤の安定性に関する遠心模型実験, 第44回地盤工学研究発表会, 2009.
- 5) 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋: 1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被害原因の検討, 海岸工学研究発表会論文集, pp.257-261, 1984.
- 6) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)・(下), 2007
- 7) Lucy, L.B: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astronomical Journal, 82, pp.1013-1024, 1977
- 8) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J.: Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181, pp. 375-389
- 9) 前田健一, 坂井守: Smoothed Particle Hydrodynamics法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発, 応用力学論文集, Vol.7, pp.775-586, 2004.
- 10) G. R. Liu and M. B. Liu: Smoothed Particle Hydrodynamics: a meshfree method, World Scientific, 2003.
- 11) Biot, M A.: General theory of three-dimensional consolidation, Journal of Applied Physics, Vol.12, pp.152-164, 1941
- 12) J. C. Martin and W. J. Moyce: Part V. An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, Mathematical and Physical Science, Vol.224, No.882, pp.312-324, 1952.
- 13) 越塚誠一: 計算力学レクチャーシリーズ5 粒子法, 丸善, pp.63-66, 2005.
- 14) 陸田秀美, 土井康明: 砕波による衝撃圧の直接推定と構造物の動的解析, 土木学会論文集B, Vol.62, No.3, pp.224-237, 2006.