

原子力発電所の津波評価技術2016

第6章 数値計算手法 ①

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事
藤井直樹（東電設計）

「第6章 数値計算手法」の概要

- ▶ 第4章、第5章の津波を評価する上で必要となる津波の数値計算手法について詳述する。
- ▶ 津波の作用としての波力・砂移動・漂流物の評価手法について取りまとめる。

2

第6章「数値計算手法」 目次

- 6.1 津波伝播・遡上計算（一部修正、追記）
- 6.2 海底での地すべり，斜面崩壊，山体崩壊等に起因する津波の計算（新規）
- 6.3 取放水設備の水位変動計算（新規）
- 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定（新規）
- 6.5 波力評価（新規）
- 6.6 砂移動計算（新規）
- 6.7 漂流物評価（新規）

3

第6章「数値計算手法」 目次

- 6.1 津波伝播・遡上計算（一部修正、追記）
- 6.2 海底での地すべり，斜面崩壊，山体崩壊等に起因する津波の計算（新規）
- 6.3 取放水設備の水位変動計算（新規）
- 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定（新規）
- 6.5 波力評価（新規）
- 6.6 砂移動計算（新規）
- 6.7 漂流物評価（新規）

4

「6.1 津波伝播・遡上計算」の構成

6.1.1 基本的考え方

6.1.2 数値計算モデルの選定

6.1.2.1 基礎方程式と計算スキーム

6.1.2.2 初期条件

6.1.2.3 境界条件の設定

6.1.3 数値計算の実施

6.1.3.1 数値計算領域の設定

6.1.3.2 計算格子間隔の設定

6.1.3.3 地形データの作成

6.1.3.4 構造物データの作成

6.1.3.5 諸係数等の設定

6.1.3.6 計算時間および計算時間間隔の設定

6.1.4 三次元モデル (新規)

6.1.4.1 基本的考え方

6.1.4.2 代表的な三次元モデル

6.1.4.3 数値計算の実施

5

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.2 数値計算モデルの選定

(1) 基礎方程式と計算スキーム : 近海伝播、遠方海域からの伝播

① 線形長波理論、② 非線形長波理論 (浅水理論)

③ 分散波理論 : 分散性の影響 (柳澤ほか, 2012), 波数分散効果 (岩瀬ほか, 2002)

(2) 初期条件

1) 海底面の鉛直変位分布

① Mansinha and Smylie(1971)の方法, Okada(1985)の方法

② 三次元不均質構造を考慮できる海底地殻変動解析による方法 (レビュー編1.2)

2) 断層変位の継続時間 (ライズタイム),

破壊開始点から断層の破壊が伝わる速度 (破壊伝播速度)

3) 初期条件の設定

① 海底面の鉛直変位分布

② 海底斜面の水平変位による水位への影響の考慮 (Tanioka and Satake, 1996)

(3) 境界条件の設定 : 沖側境界条件, 陸側境界条件, 越流境界条件

本編 p.80-86

6

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.3 数値計算の実施

(1) 数値計算領域の設定

(2) 計算格子間隔の設定 : 計算格子間隔の異なる部分領域の接続

(3) 地形データの作成 (本編3.2)

– 海域地形データ, 陸域地形データ, 過去の地形データ

(4) 構造物データの作成

1) 建物等の構造物および二次元構造物 (線の構造物)

2) 耐震性・耐津波性の考慮

3) ゲートやカーテンウォール等の水中部に開口がある構造物

(5) 諸係数等の設定

1) 摩擦項に関する係数

2) 水平渦動粘性係数

3) 津波先端に関する水深

(6) 計算時間および計算時間間隔の設定

本編 p.87-94

7

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(1) 基本的考え方

▶ 三次元モデルは、構造物周辺等の津波の三次元的な流況を再現する場合や、波力をより精密に評価する場合の有用な手段として用いることができる。

▶ ただし、津波の発生、海洋伝播、陸上遡上の3つの過程をすべて三次元モデルで実施するには膨大な計算資源が必要。

▶ そのため、計算領域の限定、現象の再現時間の適切な設定、平面二次元モデルとの適切な連結等の工夫が必要。

本編 p.95

8

「6.1 津波伝播・遡上計算」

本編 p.96-97

6.1.4 三次元モデル

(2) 代表的な三次元流体解析コード

解析コード名	出典
1 CADMAS-SURF/3D	沿岸技術研究センター(2010): 数値波動水槽の研究・開発: CADMAS-SURF/3D: 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会報告書, 沿岸技術ライブラリー, No.39.
2 OpenFOAM	OpenFOAM Foundation: OpenFOAM User Guide, http://www.openform.org/docs/ (2016年4月参照).
3 高潮津波シミュレータ (STOC: Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas)	富田孝史・柿沼太郎(2005): 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第44巻, 第2号, pp.83-98. 高橋研也・富田孝史(2013): 3次元非静水圧流動モデルを用いた久慈湾における東北地方太平洋沖地震津波の再現計算, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1166-1170.
4 DOLPHIN-3D	川崎浩司・袴田充哉(2007): 3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海洋工学論文集, 第54巻, pp.31-35.
5 津波複合災害予測モデル	米山望・永島弘士(2009): 複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.266-270.
6 C-HYDRO3D	木原直人・松山昌史(2010): 津波による土砂移動問題に対する静水圧3次元津波解析システムC-HYDRO3D Tsunamiの適用性の検討-インド洋大津波によるKirinda港周辺における土砂移動解析-, 電力中央研究所報告, N09004.

「6.1 津波伝播・遡上計算」

レビュー編 p.1-1,p.1-3

6.1.4 三次元モデル レビュー編1.1.1 (1) CADMAS-SURF/3D

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> 三次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式およびナビエ・ストークス方程式をポラスモデルに基づき拡張したものを基礎方程式とした非静水圧三次元モデル 時間方向の離散化はオイラー法, 運動方程式と連続式の連成はSMAC法, 自由表面解析モデルにVOF法を使用 陸上遡上した津波の挙動, 波圧の計算のほか, 気体・地盤・固体との連成も可能 	流体挙動および波圧について, 遡上津波に関する模型実験結果との比較から妥当性を検証(有川ほか, 2005)

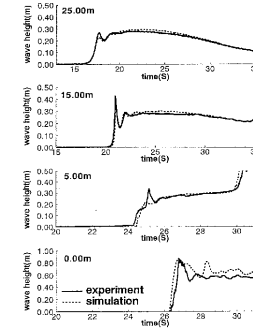


図-6 液高の時系列分布

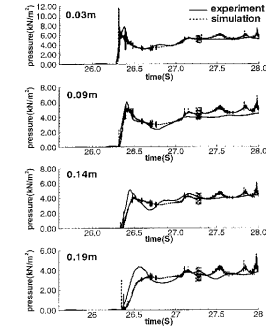


図-7 護岸に作用する圧力

「6.1 津波伝播・遡上計算」

レビュー編 p.1-1, p.1-3,p.1-4

6.1.4 三次元モデル レビュー編1.1.1 (2) OpenFOAM

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> 水と空気の不混和流体の非圧縮性の二相流を対象とした解析コード(interFoamソルバ) 非圧縮性流体の連続式およびナビエ・ストークス方程式を基礎方程式として, 有限体積法によって離散化し, PISO法を用いて流速と圧力を計算 気液界面の追跡にはVOF法を使用 遡上津波等の沿岸の津波挙動が計算可能 	水柱崩壊問題, 遡上津波物理実験の再現計算に OpenFOAMを適用し, 流体挙動や波圧の実験結果と比較検証(ファムほか, 2012; 川崎ほか, 2013)

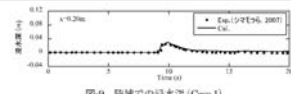


図-9 湾域での浸水深 (Case 1)

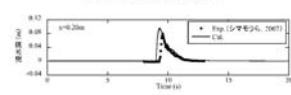


図-10 建物前面での浸水深 (Case 2)

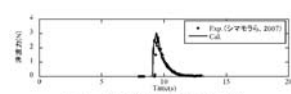


図-11 建物に作用する津波力 (Case 2)

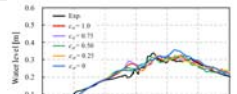


図-10 観測点における液高の時間変化

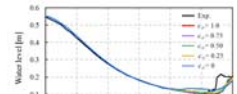


図-11 観測点における圧力の時間変化

「6.1 津波伝播・遡上計算」

レビュー編 p.1-1,p.1-5

6.1.4 三次元モデル レビュー編1.1.1 (3) 高潮津波シミュレータ

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> STOC-ICにSTOC-MLを必要に応じて接続できるハイブリッドモデル 遠地津波および近地津波の伝播・遡上, ソリトン分裂, 構造物との干渉, 津波漂流物の解析が可能 STOC-IC: 非静水圧三次元モデル, 砕波モデルに時間発展型ボアモデルを準用 STOC-ML: 計算領域を鉛直方向に多層に分割し, 各層で静水圧を仮定した準三次元モデルで単層での計算も可能 	斜面上の津波に関する模型実験, 長方形堰の越流実験, 津波防波堤に関する模型実験, 実地形による模型実験との比較から, モデルの妥当性や精度を検証(富田・柿沼, 2005; 富田・本多, 2008; 高橋・富田, 2013)

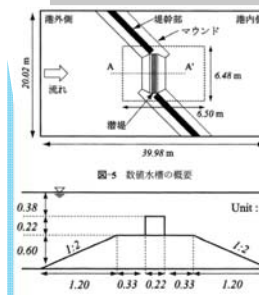


図-5 数値水槽の概要

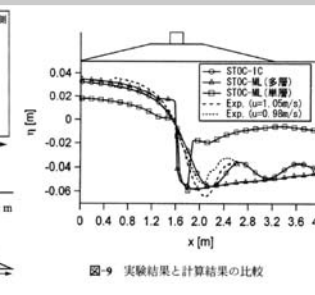


図-9 実験結果と計算結果の比較

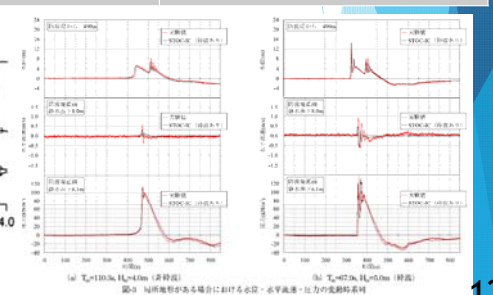


図-10 斜面堰がある場合における水柱崩壊・圧力の変動時系列

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

レビュー編1.1.1 (4) DOLPHIN-3D

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> 不等間隔格子、複数剛体の運動解析手法、ダイナミック二変数混合モデルDTMを導入したCIP法と拡張SMAC法に基づく三次元固気液多層乱流数値モデル 遡上津波等の挙動、構造物と津波の相互干渉、漂流物の動的挙動を計算可能 	流体挙動および波圧について、水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流に関する模型実験結果と比較検証 (川崎ほか, 2006; 川崎・袴田, 2007)

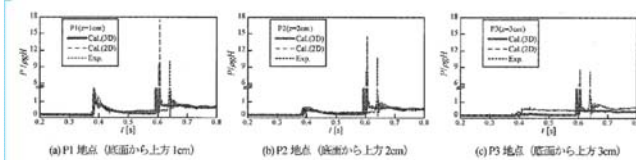


図-5 非固定剛体に作用する波圧の時系列変化

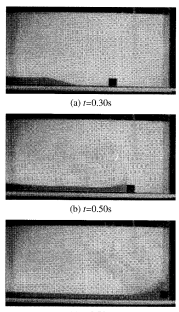


写真-1 表面形の撮影画像

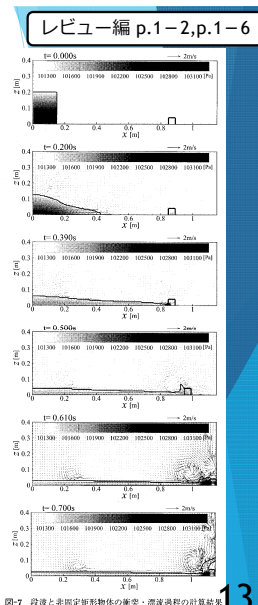


図-7 段波と非固定剛体形状の衝突・漂流過程の計算結果

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

レビュー編1.1.1 (5) 津波複合災害予測モデル

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> 非圧縮流体を対象として、水面挙動の予測にVOF法、境界形状の取扱いにFAVOR法を用いた非静水圧三次元モデル 基礎方程式は連続方程式、レイノルズ方程式、流体体積の移流方程式、乱流評価式で構成され、これらを直交座標系上で離散化してSIMPLE法に基づいて解析 流体運動のほか、船舶運動、係留索張力の計算が可能 	模型実験結果との比較から、遡上津波の挙動や漂流物挙動の妥当性を検証 (米山ほか, 2008; 米山・永島, 2009)

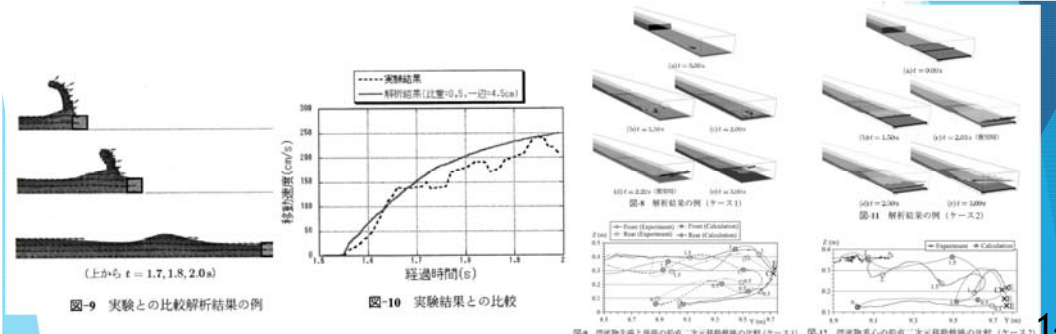


図-9 実験との比較解析結果の例

図-10 実験結果との比較

図-11 勝利結果の例 (ケース1)

図-12 勝利結果の例 (ケース2)

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

レビュー編1.1.1 (6) C-HYDRO3D

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> 地形準拠座標系に基づく局所的な連続式、路床から水面まで鉛直積分した連続式、静水圧近似を用いた水平方向の運動方程式を基礎方程式とし、静水圧近似を仮定した三次元数値モデル 乱流モデルには、鉛直方向にMellor・Yamada level2モデル、水平方向にSmagorinskyモデルを採用 基礎方程式の離散化に有限差分法、変数の配置にスタッガード配置、時間発展に半陰解法であるFSC法を使用 津波波源域から沿岸に至る津波伝播、越流・遡上流れの計算のほか、津波による地形変化、漂流物の運動の計算も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 模型実験および、2004年スマトラ沖地震津波によるスリランカの港湾周辺を対象に、津波挙動、地形変化の再現性を検証 移動床開水路実験との比較により、浮遊砂濃度の鉛直分布を検証 (木原・松山, 2010; Kihara et al., 2012)

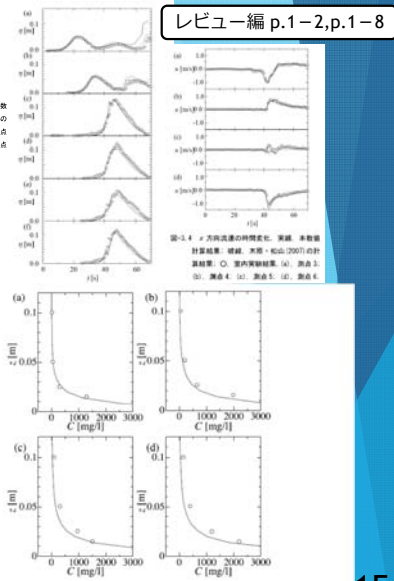
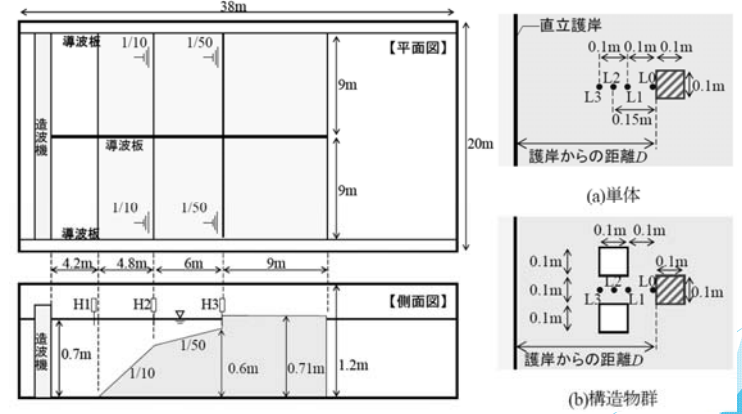


Fig. 2. Vertical profiles of the suspended sediment concentration. The solid lines denote the numerical results and the circles denote the experimental data. (a) t=0.0, (b) t=0.5, (c) t=1.0, (d) t=1.5, (e) t=2.0, (f) t=2.5

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)



有光ほか(2013)の実験装置および構造物模型の配置

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)

平面二次元モデルの計算条件

項目	設定値	
基礎方程式	非線形長波理論式および連続式	
空間格子間隔	1cm, 2cm, 2.5cm, 3.33cm, 5cm, 10cmの6パターン	
時間格子間隔	CFL条件を十分に満足するように設定	
境界条件	沖側境界 陸側境界	海域部: 孤立波 (津波高3cm) 水路側壁: 完全反射条件 陸域部: 自由透過
	陸側境界	陸上遡上を考慮
粗度係数	$n=0.010 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$	
計算時間	15秒	

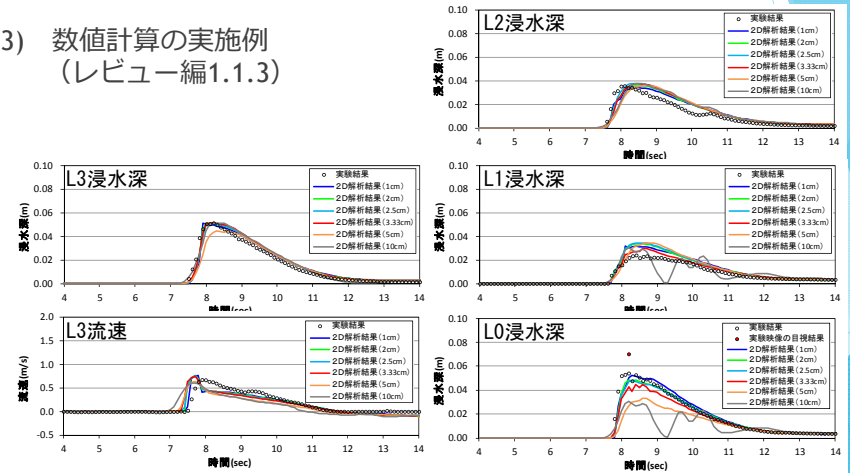
三次元モデルCADMAS-SURF/3Dの計算条件

項目	設定値	
格子間隔	$\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$	構造物周辺では以下の4パターン ・ 0.5cm×0.5cm×0.25cm ・ 0.5cm×0.5cm×0.5cm ・ 1cm×1cm×0.5cm ・ 2cm×2cm×1cm
	時間ステップ	自動
	計算時間	15s
造波モデル	孤立波 (津波高3cm)	
差分スキーム	VP-DONOR	
境界条件	流速・圧力	SLIP
	スカラー量	FREE
物性値	密度	1,000kg/m ³
	重力加速度	9.8m/s ²
	粘性	なし
オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)

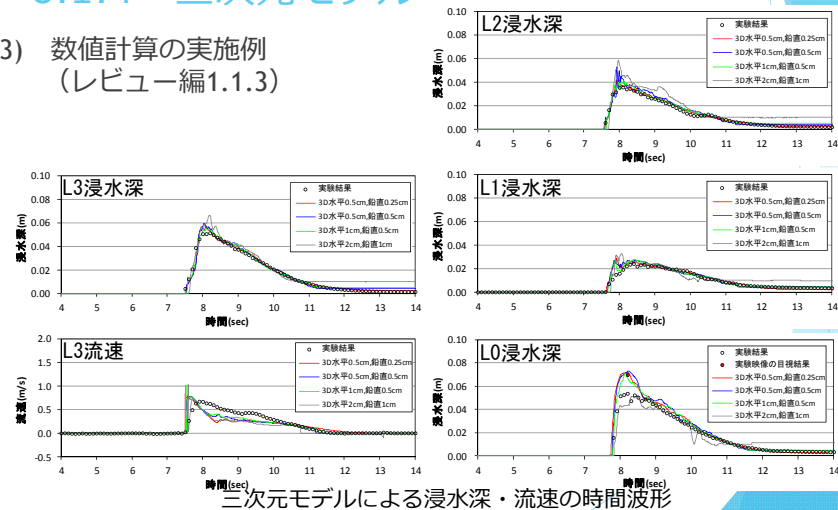


平面二次元モデルによる浸水深・流速の時間波形

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)

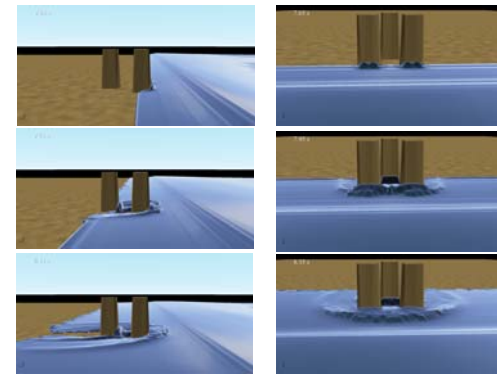


三次元モデルによる浸水深・流速の時間波形

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)



(a) 側面視点

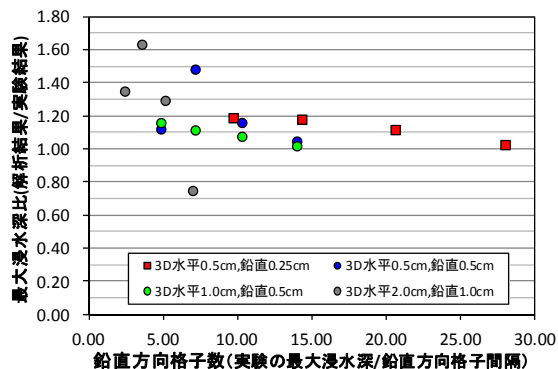
(b) 正面視点

三次元モデルによる構造物周辺の津波挙動のナップショット (水平方向格子間隔1cm・鉛直方向格子間隔 0.5cmのケース)

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)



三次元モデルによる構造物間の最大浸水深比と鉛直方向格子数の関係

レビュー編 p.1-22

21

「6.2 海底での地すべり, 斜面崩壊, 山体崩壊等に起因する津波の計算」の構成

本編 p.98-99

6.2.1 基本的考え方

▶ 本編6.1の津波の伝播・遡上計算に関する要件を踏まえたうえで, 特に津波の発生過程のモデル化や解析条件の設定に留意が必要。

6.2.2 数値計算モデルの選定

▶ 断層運動に起因して発生する津波と比べて適用事例が少ない。そのため, 手法の選定にあたっては, 各手法が想定する現象と適用範囲に注意。

▶ 計算手法が有する不確定性を考慮するための方法として, 想定する現象に対して複数の手法を選定して適用することが考えられる。複数の計算結果を相互に比較する等により手法の選定や設定の妥当性を確認する必要がある。

6.2.3 数値計算の実施

- 数値計算領域および計算格子間隔の設定
- 計算時間間隔の設定
- 地形条件
- 諸係数等

22

6.2.2 数値計算モデルの選定

地すべり等に起因して発生する津波の数値計算モデル

本編 p.98,p.100

	モデル名称	概要
1	流量モデル	崩土の海中への流入を海岸線における海水流量として与える方法
2	円弧すべり法	円弧すべり法により抽出される不安定斜面の地すべり前後の地形を与え, 海面水位に反映する方法
3	Kinematic Landslideモデル	地すべり前後の地形, 地すべりの移動速度, 地すべりの継続時間から海底地形変化を求め, 海面変動として時系列的に与える方法
4	地すべり運動解析モデル	地すべり運動を解析モデル (例えばLSFLOW, TITAN2D, FLOW3D) で解くことにより得られる崩土の層厚変化を海面変動として時系列的に与える方法
5	二層流モデル	土砂を下層, 海水を上層とする上下二層の浅水方程式を層間の相互作用を考慮して解く方法
6	Watts et al. (2005)の初期水位推定式	海底での地すべりを対象として波源域での津波の最大振幅・波長を与える予測式と津波水位の平面2次元分布を与える式を組み合わせる初期の水位分布を推定する方法
7	個別要素法	固相を個別要素法で扱い, 流体抗力を相互作用として流体相 (粒子法) とカップリングする二相流モデルを用いる方法

23

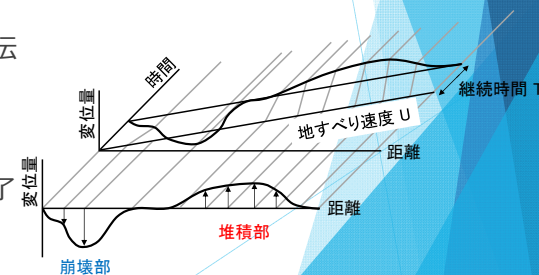
6.2.2 数値計算モデルの選定 Kinematic Landslideモデル

付属編 p.4-75
レビュー編p.1-28

▶ 海底地すべりによる津波の評価方法の一つとして, 佐竹・加藤 (2002) による運動学的地すべりモデル (KLSモデル) がある。佐竹らは, KLSモデルを用いて, 1741年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明。

▶ KLSモデルの概要

- ✓ 地形変化はすべり伝播速度 U (破壊伝播速度) と継続時間 T (破壊継続時間) で規定
- ✓ 各地点の地形変化は, 地すべり前後の地形から求め, 継続時間 T で完了
- ✓ ここで求めた時間刻みあたりの地形変化量を海面水位と海底地形に反映



24

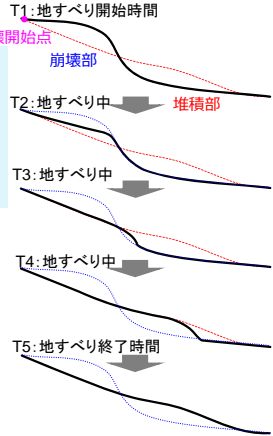
6.2.2 数値計算モデルの選定

レビュー編p.1-29

Kinematic Landslideモデル

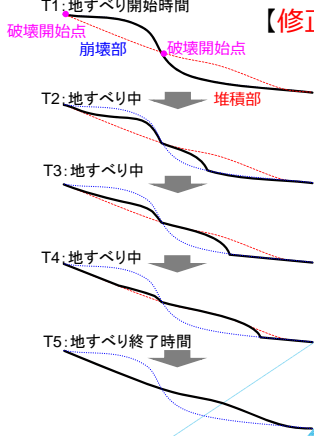
- ▶ 崩壊部・堆積部ともに水面下の現象となる大規模海底地すべりにKLSモデルを適用するにあたっての課題である『土砂収支』に着目し、殿最ほか(2015)は、崩壊と堆積が同時に進行するモデルを提案 (レビュー編1.3)

【KLSモデル】



- ・破壊開始点は崩壊部に1つ設定
- ・地すべり前面が堆積部に到達するまで、堆積が始まらない
- ・土砂収支がとれていない

【修正KLSモデル】



- ・崩壊部と堆積部に破壊開始点を設定
- ・崩壊と堆積を同時に進行させることで、土砂収支が改善される
- ・地すべり終了時間*はKLSモデルと同じ

※KLSモデルと修正KLSモデルのT1~T5は同時刻である

6.2.2 数値計算モデルの選定

付属編 p.4-76~ p.4-79

二層流モデル

- ▶ Kawamata(2005)は、土砂流の流れを再現する二層流モデルを用いて1741年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明。
- ▶ 本モデルは、上層(海水)と下層(土砂流)の流体運動ならびに両層の界面に作用する力をモデル化し、地すべりに起因する界面変位を与えるもの。

上層(海水)の支配方程式

$$\frac{\partial(\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) = -g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + v_1 \left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) + F D_1 + INT F_1$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_1^2}{D_1} \right) = -g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + v_1 \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) + F D_1 + INT F_1$$

下層(土砂流)の支配方程式

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) = -g D_2 \left(a \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + v_2 \left(\frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_x}{\rho_2} - a F D_2 - a INT F_2$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_2^2}{D_2} \right) = -g D_2 \left(a \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + v_2 \left(\frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_y}{\rho_2} - a F D_2 - a INT F_2$$

底面摩擦力 $\frac{\tau_x}{\rho_2} = \frac{g n^2}{D_2^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$, $\frac{\tau_y}{\rho_2} = \frac{g n^2}{D_2^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$

形状抵抗力 $F D_1 = \frac{1}{2} C_D \rho_1 u \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$, $F D_2 = \frac{1}{2} C_D \rho_2 v \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$

界面抵抗力 $INT F_1 = f_{int} u \sqrt{u^2 + v^2}$, $INT F_2 = f_{int} v \sqrt{u^2 + v^2}$

※ 式中の変数の定義は付属編第4章を参照

6.2.2 数値計算モデルの選定

付属編 p.4-76~ p.4-79

二層流モデル

二層流モデルの適用事例と諸係数の設定

【凡例】 - : 設定値の記載なし
* : 基礎方程式に含まれない

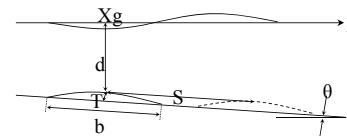
事例(文献)	諸係数の設定						備考
	α	$\frac{n}{(m^{-1/3} \cdot s)}$	$\frac{\nu}{(m^2/s)}$	f_{inter}	C_D	β	
1998年バブアニューギニア津波 (橋・今村, 2000)	-	-	-	-	-	-	基礎方程式や諸係数の設定値が論文に示されていない。
1741年寛保津波 (松本ほか, 1998)	-	-	*	0.025	2.0	3.0	底面摩擦係数はダイラント流体と仮定して求めたとしている。
1741年寛保津波 (Kawamata et al., 2005)	-	0.25, 0.4, 0.6	0.1	0.0	2.0	*	n=0.4のときに再現性が最も良かったとしている。
1792年眉山崩壊 (柳澤ほか, 2014)	-	*	*	0.01, 0.05, 0.10, 0.20	*	*	下層の底面摩擦にはクローン式を適用。
水理模型実験 (今村ほか, 2001)	-	0.08, 0.10, 0.12	0.005, 0.01, 0.02, 0.03	0.0, 0.05, 0.20, 1.00	*	*	n=0.12, $\nu=0.01$ が最適であったとしている。
水理模型実験 (Kawamata et al., 2005)	-	気中: 0.01 水中: 0.12	0.01	0.2	10	*	

6.2.2 数値計算モデルの選定

付属編 p.4-80~ p.4-82

Watts et al.(2005)の初期水位推定式

- ▶ 海底地すべりによる津波の簡易評価方法の一つとして、Wattsら(2005)の方法で初期水位分布を設定して津波伝播計算を行うモデル(Wattsモデル)がある。
- ▶ Wattsら(2005)が提案する初期水位波形の予測式は、次式で表される。



$$a_0 = g \sin \theta \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + C_m} \right) \left(1 - \frac{\tan \Psi}{\tan \theta} \right) \quad u_r = \sqrt{g d} \sqrt{\frac{B \sin \theta \pi (\gamma - 1)}{2 C_d} \left(1 - \frac{\tan \Psi}{\tan \theta} \right)} \quad S_0 = \frac{u_r^2}{a_0}, \quad t_0 = \frac{u_r}{a_0}, \quad \lambda_0 = t_0 \sqrt{g d}$$

$$\eta_{0,2D} = S_0 (0.0574 - 0.0431 \sin \theta) \left(\frac{T}{b} \right) \left(\frac{b \sin \theta}{d} \right)^{1.25} (1 - e^{-2.2(\gamma - 1)})$$

$$\eta(x) = -\frac{\eta_{0,2D}}{\eta_{min}} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{x - x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} - \kappa' \exp \left\{ - \left(\frac{x - \Delta x - x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \right]$$

※ 式中の変数の定義は付属編第4章を参照

※1 Grilli, S.T., and P. Watts (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analysis, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.283-297.
※2 Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298-310.

6.2.3 数値計算の実施

(1) 数値計算領域および計算格子間隔の設定

- ▶ 地すべり等の発生を想定する波源域では、崩壊域・堆積域の大きさや発生する津波の波長を考慮して、選定した数値計算モデルに応じた適切な計算格子間隔を設定。（参考情報 付属編4.6.2）

(2) 計算時間間隔の設定

- ▶ 計算結果の妥当性や収束を確認することで判断が必要。

(3) 地形条件

- ▶ 地すべり等に起因して発生する津波の数値計算の入力条件として、崩壊土砂量や崩壊前後の地形、すべり面の地形といった地すべりに係る地形条件が必要になる場合がある。（参考資料 本編3.3.1）

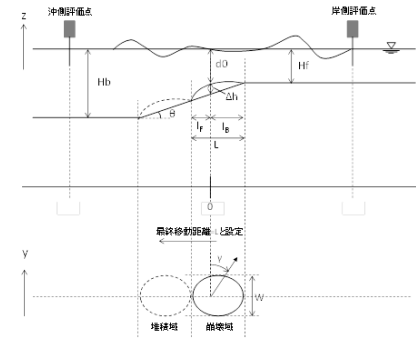
(4) 諸係数等

- ▶ 付属編4.6.1：既往検討における諸係数の設定値
- ▶ 付属編4.6.3：地形条件や諸係数が計算津波水位に与える影響

6.2.3 数値計算の実施

付属編4.6.2 適切な格子間隔に関する検討

- ▶ 海底地すべりを模式化した仮想的な地形を作成し、二層流モデルとKLSモデルを適用



模式化地形のパラメータ設定

パラメータ	設定値
Δh (m)	30
Hf (m)	500
Hb (m)	$H_f + 2L \tan \theta$
θ (°)	3, 6, 12
κ (= l_f/l_b)	1.0
L	600
W	600
Υ (= ρ_s/ρ_{water})	1.85
b	0.5L

海底地形，地すべり地形の模式化（海底地すべり）

6.2.3 数値計算の実施

付属編4.6.2 適切な格子間隔に関する検討

▶ 計算条件

項目	設定値
空間格子間隔 (m)	15, 30, 60, 120
計算時間間隔 (s)	0.05
海水・海底間のマニング粗度係数 ($m^{-1/3}s$)	0.03
海水の渦動粘性係数 (m^2/s)	10.0

モデル	パラメータ	記号 (単位)	設定値
二層流	下層 (土砂層)		
	底面のマニング粗度係数	n ($m^{-1/3}s$)	0.2, 0.3, 0.4
	下層 (土砂層) の渦動粘性係数	ν (m^2/s)	0.01
	抗力係数	C_D (-)	0
KLS	界面抵抗係数	f_{inter} (-)	0
	水平方向伝播速度	U (m/s)	10, 20, 40
	継続時間	T (s)	120, 240, 480

6.2.3 数値計算の実施

付属編4.6.2 適切な格子間隔に関する検討

- ▶ 計算結果（最大水位と最小格子間隔ケースとの差）

斜面勾配は6度，土砂層の粗度係数 n は $0.4m^{-1/3} \cdot s$ 斜面勾配は6度，伝播速度 U は40m/s，継続時間 T は120s

二層流モデル，沖側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.05219	-0.00679	-	-
30 (=L/20)	0.05453	-0.00748	+4.5%	10.2%
60 (=L/10)	0.04963	-0.00779	-4.9%	14.7%
120 (=L/5)	0.03675	-0.02206	-29.6%	224.9%

KLSモデル，沖側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.05057	0.06758	-	-
30 (=L/20)	0.0496	0.07097	-1.9%	+5.0%
60 (=L/10)	0.05327	0.06701	+5.3%	-0.8%
120 (=L/5)	0.06338	0.05289	+25.3%	-21.7%

二層流モデル，岸側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.00703	-0.04920	-	-
30 (=L/20)	0.00916	-0.04801	+30.3%	-2.4%
60 (=L/10)	0.01685	-0.04158	+139.7%	-15.5%
120 (=L/5)	0.02347	-0.02750	+233.9%	-44.1%

KLSモデル，岸側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.0176	-0.03334	-	-
30 (=L/20)	0.01758	-0.03372	-0.1%	1.1%
60 (=L/10)	0.01797	-0.0388	2.1%	16.4%
120 (=L/5)	0.01968	-0.03807	11.8%	14.2%

二層流モデルの解は指向性が強く出るため，沖側評価点では上昇側が，岸側評価点では下降側が支配的となる。

二層流モデル，KLSモデルともに，本計算例においては，空間格子間隔を地すべり域の大きさ L の1/20程度とした場合に最大水位変化量が概ね収束した。