

# 東北地方太平洋沖地震津波を 踏まえた津波評価技術

原子力発電所の津波評価技術改訂版について(3)

津波評価小委員会幹事  
藤井直樹(東電設計)

2015/9/16

# 「第6章 数値計算手法」の概要(1)

- 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。

# 「第6章 数値計算手法」の概要(2)

- 6.1 津波伝播・遡上計算(一部修正、追記)
- 6.2 海底地すべり, 斜面崩壊, 山体崩壊に伴い発生する津波の計算(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)

# 6.1 津波伝播・遡上計算

## (1) 数値計算モデルの選定

### 1) 基礎方程式と計算スキーム

- ① 近海伝播
  - 非線形長波理論, 非線形分散波理論
- ② 遠方海域からの伝播
  - 線形長波理論, 線形分散波理論

### 2) 初期条件

- ① 海底面の鉛直変位分布
  - Mansinha and Smylie(1971)の方法, Okada(1985)の方法
  - 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(土屋ら, 2013)
- ② 海底変位の継続時間(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
  - 海底面の鉛直変位分布
  - 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

- ① 沖側境界条件
  - 計算領域内から領域外へ向かう波が存在する場合の境界条件
  - 近海での沖側境界から波を入射する方法
- ② 陸側境界条件 : 完全反射条件, 陸上遡上境界条件
- ③ 越流境界条件
  - 防波堤等を格子の地盤高で表現する場合
  - 防波堤等を格子間の境界で表現する場合

# 6.1 津波伝播・遡上計算

## (2)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
  - ① 計算格子間隔
  - ② 計算格子間隔の異なる部分領域の結合
- 3) 地形データの作成
  - ① 水深データ
  - ② 陸域地形データ
  - ③ 過去の地形データ
- 4) 構造物データの作成
  - ① 建物などの構造物および線的構造物
  - 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 建物などの構造物および線的構造物
  - ② 摩擦項に関する係数
  - ③ 水平渦動粘性係数
  - ④ 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
  - ① 計算時間
  - ② 計算時間間隔の設定
- 7) 三次元モデル
  - VOF法による非圧縮性流体解析
  - CADMAS-SURF/3D, OpenFOAM等

# 6.2 海底地すべり，斜面崩壊，山体崩壊に伴い発生する津波の計算(1)

## 1) 基本的考え方

- 海底地すべり，斜面崩壊，火山活動に起因する山体崩壊に伴い発生する津波の計算にあたっては，6.1に記載した津波の伝播・遡上計算に関する要件を踏まえた上で，津波の発生過程のモデル化や津波の発生領域における条件の設定に特に留意する必要がある。

## 2) 数値計算モデルの選定

- 地すべり等に伴い発生する津波については各種計算手法が提案されているものの，地震に伴い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する必要がある。
- 計算手法が有する不確かさ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などして手法の選定や設定の妥当性を確認する必要がある。

# 6.2 海底地すべり, 斜面崩壊, 山体崩壊に伴い発生する津波の計算(2)

## 地すべり等に伴い発生する津波の数値計算モデル

モデル名称	概要	適用例
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	1792年島原眉山崩壊(相田, 1975), 1640年駒ヶ岳崩壊(西村・清水, 1993)
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	1771年明和八重山(平石・他, 2001)
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	1741年渡島大島山体崩壊(佐竹・加藤, 2002, Satake, 2007), オアフ島沖海底地すべり(Satake, 2001)
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	1792年島原眉山崩壊(笹原, 2004)
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	1998年パプアニューギニア海底地すべり(橋, 1999), 1741年渡島大島山体崩壊(Kawamata, 2005)等
Watts et al.(2005)の初期水位推定式	海底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	1994年Skagway, 1998年パプアニューギニア, 1999年Izmit等の海底地すべり(Watts, 2005)(ただし, 既往津波との比較による検証が実施されているのは最大振幅の予測式のみ)
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	水槽実験の再現(後藤他, 2011)

# 6.3 取放水設備の水位変動計算(1)

## 1) 計算の目的

- 津波が原子力発電所へ到達した際に想定されるリスクのうち、取放水設備に関連したリスク(設備からの溢水による敷地への浸水、ポンプモーター部への浸水、ポンプ取水不能等)に対して、取放水設備の水位変動計算を実施し、設備内の水位の挙動を把握する。
- 設備内での水位変動が増幅しないことが明らかな場合は、計算を省略することができる。

## 2) 数値計算手法の選定

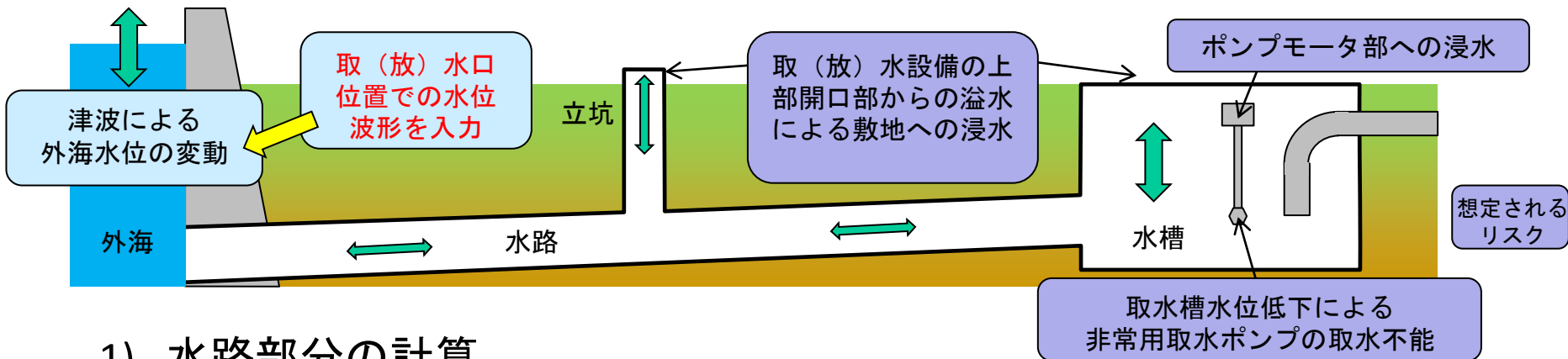
- 取放水口位置での水位波形を境界条件(入力波形)として使用する。
- 取放水路内の流れは、水路に沿った一次元流れとして取り扱うことができ、開水路流れや管路流れといった流況を精度よく計算可能な手法を適用する。

## 3) 取放水設備のモデル化と数値計算の実施

- 入力波形に設備の固有周期程度の成分が含まれていると、取放水槽等の水位変動が増幅される場合があり、設備形状を精度よくモデル化することが重要である。
- 設備の構造図面等に基づき水路や水槽の形状等を設定するとともに、水路の摩擦損失や形状損失(屈折・曲がり等)、設備内構造物(スクリーン、越流堰等)を適切に設定する必要がある。



## 6.3 取放水設備の水位変動計算(2)



### 1) 水路部分の計算

(a)全区間が常時管路流れの場合:管路流れの一次元不定流モデル

(b)全区間が常時開水路流れの場合:

①開水路流れの一次元不定流モデル, ②平面二次元モデル

(c)開水路流れの区間と管路流れの区間が共存する場合:

①スロットモデル, ②開水路区間と管路区間を分離する計算手法

### 2) 取放水槽や立坑の計算

①水槽内の水容積変化のみを考慮したモデルによる計算手法

②一次元水路モデルによる計算手法

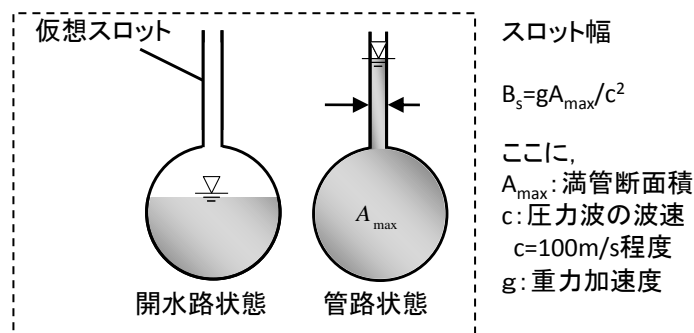
③平面二次元モデルによる計算手法

④三次元モデルによる計算手法

# 6.3 取放水設備の水位変動計算(3)

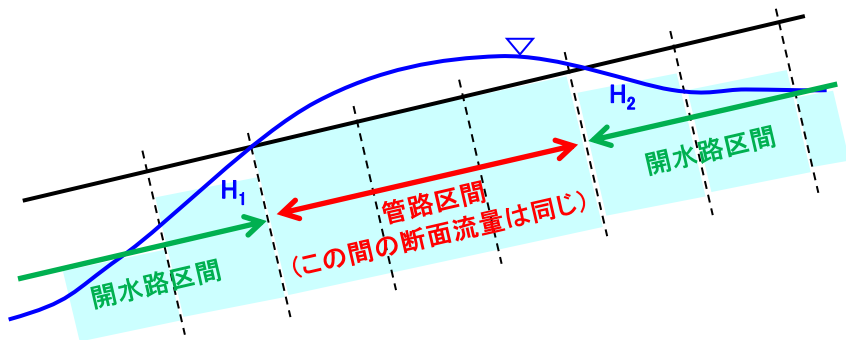
## ① スロットモデルによる計算

管の上部に仮想スロットを設定することにより、管路区間も開水路流れとして取り扱うことができる。したがって、開水路区間と管路区間を区別する必要がなくなり、全区間で開水路の一次元不定流の式を適用する手法である。スロット幅は、満管断面積と圧力波の波速(100m/s程度)によって設定される。



## ② 開水路区間と管路区間を分離する計算手法

微小区間に分割した水路の各部分が、開水路状態か管路状態かを逐次判定し、管路区間はその上下流端の開水路区間の水位(自由水面の水位)を境界条件として、管路区間の流量計算を行う(管路区間では圧力波の波速を無限大と仮定する)。開水路区間は、開水路の一次元不定流の式を適用する。



# 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる 断層モデルの策定

## 1) 計算モデルの適合度の評価

- 計算モデルの適合度は、適切な地形条件と波源モデルを用いて津波の解析を実施し、精度の高い痕跡高データを用いて、相田(1977)による幾何平均 $K$ および幾何標準偏差 $k$ に基づき評価する。

## 2) 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定

- 既往津波の波源モデルについては、沿岸における津波の痕跡高をよく説明できるように波源のパラメータを設定する。
- 一般に、地震に起因する津波の場合、地震動を説明できる断層モデルと、津波の痕跡高を説明できる断層モデルは必ずしも整合しない。既往津波の波源モデルを設定するにあたっては、沿岸における津波の痕跡高をよく説明できるように波源のパラメータを設定することが第一に重要である。
- 既往津波に対する適切な断層モデルが提案されていない場合、津波インバージョン解析によって断層モデルを策定する方法が有効である。代表的な手法として、以下の手法がある。
  - ① 非線形インバージョン手法(中央防災会議, 2003)
  - ② 線形インバージョン解析(Satake, 1987)
  - ③ 浅水変形効果を考慮した線形インバージョン解析(安中ら, 1999)

# 6.5 波力評価(1)

## 1) 基本的考え方

- 防潮堤, 防波堤, 建屋, 水密扉などに津波が到達する場合、その施設の機能が確保できることを確認するために、津波波力を適切に算定することが必要となる。
- 津波波力については、評価対象とする構造物の設置位置(海中, 陸上)を踏まえた上で、津波水位, 浸水深, 流速の時間変動等の情報に基づき、適切な算定式を用いて波力(波圧を含む)を算定する。
- 既往の評価式の適用が困難と考えられる場合などには、水理模型実験や三次元数値解析を行うことがある。

## 2) 波力の算定

### ①海中構造物に作用する津波波力

- 直立型の海中構造物に作用する津波波力評価式  
「防波堤の耐津波設計ガイドライン」(国土交通省(2013))
- 傾斜型の海中構造物に作用する津波波力評価式

### ②陸上構造物に作用する津波波力

- 陸上構造物に作用する津波波力評価式の分類
- 遡上計算における対象構造物の有無
- 波力算定に用いる水理量
- 対象とする波圧
- ソリトン分裂の有無
- 対象構造物の形状

# 6.5 波力評価(2)

## 陸上構造物に作用する津波波力評価式の分類

津波波力評価式	遡上計算における対象構造物の有無	波力算定に用いる水理量	ソリトン分裂の有無	対象構造物の形状	
朝倉ら(2000)	構造物なし	最大浸水深(進行波)	分裂・非分裂	二次元構造物	
内閣府(2005)		最大浸水深	非分裂	三次元構造物	
国交省(2012)		最大浸水深	非分裂	三次元構造物	
消防庁(2009)		最大浸水深(進行波)	非分裂	二次元構造物(防油堤)	
		最大浸水深・流速(進行波)	非分裂	三次元構造物(屋外タンク)	
Asakura et al.(2002)		最大浸水深・流速(進行波)	非分裂	二次元構造物・三次元構造物	
榊山(2012)		最大浸水深・流速(進行波)	非分裂	二次元構造物	
大森ら(2000)		最大浸水深・流速(進行波)	非分裂	三次元構造物	
飯塚・松富(2000)	構造物あり	浸水深	非分裂	三次元構造物	
		浸水深・流速	非分裂	三次元構造物	
		有光ら(2012)	浸水深・流速	非分裂	二次元構造物・三次元構造物
		木原ら(2012)	浸水深・流速	非分裂	三次元構造物
		高畠ら(2013)	浸水深・流速	非分裂	二次元構造物

# 6.6 砂移動計算

## 1) 基本的考え方

津波による砂の移動が原子力施設に与える影響として、取水口前面への砂の堆積による取水機能の低下や、防波堤等構造物周りの砂の洗掘による構造物の倒壊・流失などが挙げられる。このような現象の影響を評価する場合には、適切な海底地形変化予測モデルを用いて砂移動計算を実施し、取水口前面での砂の堆積、構造物周りでの洗掘を評価することが必要となる。

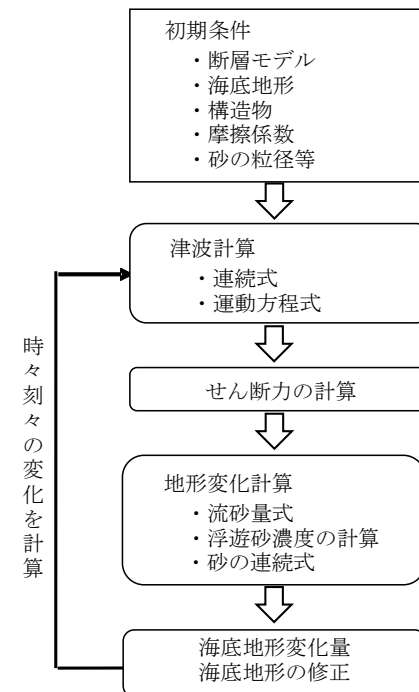
## 2) 数値解析モデルの選定

- 藤井ら(1998), 高橋ら(1999), 池野ら(2009), 高橋ら(2011)の手法

- ①せん断力の評価
- ②流砂量式
- ③浮遊砂の考慮

## 3) 計算条件および諸係数

- 初期砂層分布・堆積厚さ
- 粒径・密度
- 浮遊砂上限濃度
- 空隙率
- 沈降速度
- 空間格子間隔



津波による砂移動計算の流れ

# 6.7 漂流物評価(1)

## 1) 漂流物挙動の基本的考え方

- 津波により発生する漂流物に関して、構築物・機器等への衝突や緊急時の取水経路等を閉塞する可能性が考えられる場合には、津波時の漂流物挙動について把握することが必要となる。
- 津波時の漂流物挙動については、非線形長波理論に基づいた平面二次元モデルから求まる浸水深、流速、流向等の時間変動の情報に基づき、適切に設定することを基本とする。近年、津波の挙動と漂流物の挙動(浮遊、衝突、水没等)を同時に解析する手法の研究が進められており、これらの解析手法の適用性を確認したうえで用いることがある。

## 2) 漂流物による衝突力の算定

- 漂流物・被衝突物の選定
- 衝突力の算定方法
- 衝突力算定式の選定

# 6.7 漂流物評価(2)

## 漂流物の衝突力算定式の整理

	漂流物の種類	算定式
松富ら (1999)	木材 (円柱)	$F_m / (\gamma D^2 L) = (1.2 \sim 1.5) C_{MA} \left\{ V_{A0} / (gD) \right\}^{1.2} (\sigma_f / \gamma L)^{0.4}$ <p> <math>F_m</math>: 衝突力, <math>\gamma</math>: 流木の単位体積重量, <math>D</math>: 木材の直径,  <math>L</math>: 木材の長さ, <math>g</math>: 重力加速度,  <math>C_{MA}</math>: 見かけの質量係数(水の緩衝機能も加味),  <math>V_{A0}</math>: 衝突速度, <math>\sigma_f</math>: 木材の降伏応力         </p>
池野ら (2003)	木材 (円柱, 角柱, 球状体)	$F_H / (gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \left\{ V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25}) \right\}^{2.5}$ <p> <math>F_H</math>: 衝突力, <math>g</math>: 重力加速度, <math>M</math>: 漂流物の重量,  <math>S</math>: 係数(=5.0), <math>C_{MA}</math>: 付加質量係数, <math>V_H</math>: 漂流物移動速度,  <math>D</math>: 漂流物の直径(角柱の場合は正方形断面辺長),  <math>L</math>: 漂流物の長さ         </p>
道路橋 示方書	流木等	$P = 0.1Wv$ <p> <math>P</math>: 衝突力, <math>W</math>: 流送物の重量, <math>v</math>: 表面流速         </p>
FEMA (2012)	木材 コンテナ	$F_i = 1.3u_{max} \sqrt{km_d(1+c)}$ <p> <math>F_i</math>: 衝突力, <math>c</math>: 付加質量係数, <math>u_{max}</math>: 漂流物を運ぶ流体の最大流速,  <math>m_d, k</math>: 漂流物の質量と有効剛性         </p>
水谷ら (2005)	コンテナ	$F_m = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \left( \frac{WV_x}{gdt} \right) \quad V_x \doteq C_x = 2\sqrt{g\eta_m}$ <p> <math>F_m</math>: 衝突力, <math>g</math>: 重力加速度, <math>W</math>: コンテナの重量,  <math>B_c</math>: コンテナ幅, <math>\eta_m</math>: 遡上波の最大水位, <math>dt</math>: 衝突時間,  <math>\rho_w</math>: 水の密度, <math>V_x</math>: コンテナの漂流速度,  <math>C_x</math>: 津波の遡上流速         </p>
有川ら (2010)	コンテナ 流木	$F = \gamma_p \chi^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5}{4} \tilde{m} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}}, \quad \chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, \quad k = \frac{(1-\nu^2)}{\pi E}$ $\tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ <p> <math>a</math>: 衝突面半径の1/2(ここではコンテナ衝突面の縦横長さの平均の1/4), <math>E</math>: コンクリートのヤング率, <math>\nu</math>: ポアソン比,  <math>m</math>: 質量, <math>v</math>: 衝突速度, <math>\gamma_p</math>: 塑性によるエネルギー減衰効果,            添字 1,2 は衝突体と被衝突体を表す.         </p>
本州四国 連絡橋 技術関係 基準集	船舶	$F = \frac{WV^2}{4gD}$ <p> <math>F</math>: 衝突力, <math>W</math>: 衝突船舶の重量, <math>V</math>: 衝突速度,  <math>D</math>: 衝突船舶の停止距離         </p>