安定化有限要素法による津波遡上および流体力の解析手法の構築

Development of a Numerical Method for Tsunami Runup and Fluid Force based on Stabilized Finite Element Method

利根川 大介*・樫山 和男**

Daisuke TONEGAWA, Kazuo KASHIYAMA

*正会員 修(工) (株)IHI エネルギー事業本部(〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-1-1) **正会員 工博 中央大学 理工学部 都市環境学科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

This paper presents a numerical simulation method for the analysis of Tsunami runup and fluid forces acting on buildings. The nonlinear dispersive wave theory is employed for the governing equation in order to describe the wave nonlinearity and wave frequency dispersion accurately. The stabilized finite element method based on SUPG (Streamline Upwind/Petrov Galerkin) method is employed for the discretization in space. The Eurian approach using a fixed mesh is employed for the treatment method of moving boundary. The evaluation method of fluid force and the collapse of building are also investigated. The present method is applied to several numerical examples to show the validity of the method.

Key Words : stabilized finite element method , Boussinesq equation , Tsunami runup , fluid force, collapse of building

1. はじめに

地震により発生する津波は,時に沿岸域に甚大な被 害を与える.このため沿岸域の各自治体においては,そ の被害を最小限に抑えるための防災対策の検討が急務 となっている.津波による防災対策を行う上で,津波到 達時間や最大遡上域の予測,構造物の被害を正確に把 握することは重要である.これらに関する検討は,実 験的研究に加えて,近年では計算機性能及び数値解析 技術の飛躍的な進歩により,数値解析が盛んに用いら れるようになってきている.

津波の数値解析手法としては,これまで有限差分法 による解析が一般的であり,既往の研究^{1),2),3),4)}におい て多くの方法が提案され,防災対策等の検討に広く用 いられている.しかしその多くは構造格子に基づく解 析であり,近年ではGISデータの整備・普及により複 雑な自然地形や構造物群の形状データを容易に取得可 能となったこともあり,それらを正確に考慮可能な非 構造格子に基づく方法が注目されている.また,津波 による構造物の被害を定量的に予測するためには,構 造物に作用する流体力を正確に評価することは必要不 可欠であり,この点からも構造物形状を正確に再現で きる非構造格子に基づく手法は有効であるといえる.

そこで本論文はこれらの背景のもと,波の伝播形態, 遡上,建物に働く流体力を正確に評価可能であり,建 物の倒壊を考慮した津波の数値解析手法の構築を目的 とし,安定化有限要素法に基づく手法の提案を行うも のである.津波の支配方程式としては,非線形長波方 程式による解析が一般的ではあるが,実際の現象では, 波の波数分散効果によるソリトン分裂や波状段波など 非線形性のみを考慮した非線形長波方程式では表現で きない現象が数多く報告されている.従って,本研究で は支配方程式として,波の非線形性と分散性を考慮した非線形分散波方程式の一つである Boussinesq方程式 ⁵⁾を用いる.離散化手法には,複雑な自然地形や建物群 を正確に考慮するため,任意形状への適合性に優れた SUPG(Streamline Upwind/Petrov Galerkin)法⁶⁾⁷⁾に基づ く安定化有限要素法により空間方向の離散化を行った. なお,要素としては三角形1次要素を用いた.一方,時 間方向の離散化には2次精度を有する Crank-Nicolson 法を用いた.遡上域における移動境界手法としては,固 定メッシュに基づく Euler 的手法⁸⁾を用い,砕波の表現 には,粘性項の渦動粘性係数により,砕波のエネルギー 散逸を表現する砕波減衰モデル¹⁰⁾を用いた.また,本研 究では,構造物およびその倒壊を考慮するため,流体力 の評価法と倒壊アルゴリズムについても検討を行った.

数値解析例として,本手法の砕波・遡上問題への有 効性の検討を行うため孤立波遡上問題,流体力の評価 法の妥当性の検討として建物を有する津波遡上問題を 取り上げ,実験結果との比較を行った.そして応用例 として,本手法を実地形での東南海・南海地震による 津波を想定した建物群を有する津波遡上問題の解析を 行った.

2. 数值解析手法

2.1 支配方程式

非線形分散波方程式は,非圧縮性粘性流体の Navier-Stokes 方程式を鉛直方向に平均化することにより得ら れる非線形長波方程式に,鉛直方向の加速度を考慮す ることにより得られる.以下に支配方程式として用い る弱非線形性弱分散性を仮定した Boussinesq 方程式を 示す.



図-1 座標系

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{N}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_i} \left(\mathbf{K} \right) + \mathbf{R} - \mathbf{G} \mathbf{U}$$
(1)

ここで, Uは保存変数であり, 以下のようである.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} H \\ u_1 H \\ u_2 H \end{bmatrix}$$
(2)

ここで, *u_i* は *x*, *y* 方向の断面平均流速, *H* は全水深で ある.また各ベクトル,マトリックスはそれぞれ以下 のようである.

$$\mathbf{A}_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^{2} - u_{1}^{2} & 2u_{1} & 0 \\ -u_{1}u_{2} & u_{2} & u_{1} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -u_{1}u_{2} & u_{2} & u_{1} \\ c^{2} - u_{2}^{2} & 0 & 2u_{2} \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{N}_{11} = \mathbf{v}_{e} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2u_{1} & 2 & 0 \\ -u_{2} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_{12} = \mathbf{v}_{e} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -u_{1} & 1 & 0 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{N}_{21} = \mathbf{v}_{e} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u_{2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_{22} = \mathbf{v}_{e} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u_{1} & 1 & 0 \\ -2u_{2} & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0\\ \frac{h^2}{3} \frac{\partial u_i H}{\partial x_1}\\ \frac{h^2}{3} \frac{\partial u_i H}{\partial x_2} \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0\\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_1}\\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_f \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_f \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} \end{bmatrix}, \quad C_f = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$$

ここで,hは静水深, v_e は平均化された渦動粘性係数, nはマニングの粗度係数,cは波速,gは重力加速度,zは基準面からの高さである.また, A_i , N_{ij} ,G は移流 項,粘性項,摩擦項の行列,K,R は分散項,圧力に関 する項である.なお,座標系は図-1のように定義する.

2.2 安定化有限要素法

支配方程式(1)に対して,空間方向の離散化として SUPG法に基づく安定化有限要素法⁶⁾を適用する.また, 粘性項,分散項に対して,部分積分を適用することに より,以下に示すような弱形式が得られる.

$$\int_{\Omega} \mathbf{U}^* \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}_i} + \mathbf{G}\mathbf{U} - \mathbf{R}\right) d\Omega$$

+
$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial \mathbf{x}_i}\right) \cdot \left(\mathbf{N}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{K})\right) d\Omega$$

+
$$\sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \tau(\mathbf{A}_j)^T \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial \mathbf{x}_j}\right)$$

$$\cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}_i} + \mathbf{G}\mathbf{U} - \mathbf{R}\right) d\Omega$$

+
$$\sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \delta\left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial \mathbf{x}_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}_i}\right) d\Omega = 0$$
(3)

上式において左辺1,2項目は Galerkin 項であり,3項 目の要素ごとの積分の総和項は SUPG 法による安定化 項,4項目の要素ごとの積分の総和項は水位の不連続面 での数値不安定性を回避する衝撃捕捉 (shock-capturing) 項である.また,右辺には部分積分を適用したことに より生じる境界積分項が発生するするが,流速が規定 される壁面では重み関数がゼロとなること,壁面以外 の境界(開境界)ではトラクションをゼロとする条件 を仮定することによりゼロとなる.また, τ , δ は安定 化パラメータ⁷⁾であり,以下のようである.

$$\tau = \left(\frac{1}{(\tau_{S \ UGN1})^2} + \frac{1}{(\tau_{S \ UGN2})^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\tau_{S \ UGN1} = \left(\sum_{a=1}^{n_{en}} (c \mid \mathbf{j} \cdot \nabla N_a \mid + \mid \mathbf{u} \cdot \nabla N_a \mid)\right)^{-1}$$

$$\tau_{S \ UGN2} = \frac{\Delta t}{2} \quad , \quad \mathbf{j} = \frac{\nabla H}{\parallel \nabla H \parallel}$$

$$\delta = \tau_{S HOC} (||\mathbf{u}_{int}||)^2$$

$$\tau_{S HOC} = \left(\sum_{\alpha=1}^{n_{en}} |\mathbf{u} \cdot \nabla N_{\alpha}|\right)^{-1} \qquad ||\mathbf{u}_{int}|| = ||\mathbf{u}||$$

ここで, N_a は形状関数である.なお,空間方向の離散 化には三角形1次要素を用いた.すると,最終的に次 の有限要素方程式が得られる.

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_{\tau} + \mathbf{D}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{S} + \mathbf{S}_{\tau}) \mathbf{U} + \mathbf{E}\mathbf{U} + (\mathbf{B} + \mathbf{B}_{\tau}) \mathbf{U} + (\mathbf{H} + \mathbf{H}_{\tau}) \mathbf{R} + \mathbf{C}\mathbf{U} = 0 \quad (4)$$

ここに,M は質量行列,D は分散行列,S は移流行列, E は粘性行列,B は摩擦行列,H は圧力行列である.な お,添え字 τ は SUPG 項に起因する行列を,C は衝撃 捕捉項に起因する行列である.

一方,時間方向の離散化においては,時間ステップ *n*+θ(0≤θ≤1)で満足することを考え,時間微分項およ

$$\frac{\partial \mathbf{U}^{n+\theta}}{\partial t} = \frac{\mathbf{U}^{n+1} - \mathbf{U}^n}{\Delta t}$$
(5)

$$\mathbf{U}^{n+\theta} = \theta \mathbf{U}^{n+1} + (1-\theta)\mathbf{U}^n \tag{6}$$

ここで, θ は時間積分の安定性と精度を制御するパラ メータであり,本研究では 2 次精度を保証する θ =0.5 の Crank-Nicolson 法を用いる.

以上の空間・時間方向の離散化の結果として得られ る連立一次方程式の解法には,反復解法の一つである Element-By-Element Bi-CGSTAB 法を用いる.

2.3 砕波減衰モデル

Boussinesq 方程式では砕波等による運動量散逸を直 接表現することが困難なため,砕波による波高減衰が 表現できないという問題点がある.そこで本研究では, 岩瀬らによって提案された砕波減衰モデル¹⁰⁾を用いる. 粘性項の渦動粘性係数係数により運動量散逸を表現し, 砕波判定には流速波速比を用いる.流速波速比が0.59 を超えたら砕波とし以下の渦動粘性係数の式(7)を空間 分布として与え,砕波による波高減衰を表現し,0.59 未満のときは非砕波とし渦動粘性係数は0とする.

$$\nu_e = \beta \sqrt{gH}\zeta \tag{7}$$

ここで, β は係数であり,水理実験と数値計算の比較に より決められた係数 β=0.23 とした.

2.4 移動境界手法

津波遡上解析において, 遡上域における水際線の挙動を評価する方法として移動境界処理手法がある.移動境界処理手法の基本的な考え方は,固定メッシュを用いて水際線を間接的に表現する Euler 的手法⁸⁾と移動メッシュを用いて水際線を直接表現する Lagrange 的手法⁹⁾の二つの手法に分類できる.両手法はそれぞれ長所・短所があるが,本研究では複雑な自然地形や建物群を考慮した津波遡上解析を行うことを目的とするため,計算のロバスト性に優れている前者の Euler 的手法⁸⁾を用いる.以下にそのアルゴリズムを図-2 を用いて示す.

- 3節点ともに全水深 Hⁿ が, ε以下となる要素(図-2 要素(7),(8))は陸域要素とみなし,計算領域から 除外する.その際 uⁿ_i = 0を与える.
- 3節点ともに全水深 Hⁿ が, ε以上となる要素(図-2 要素(1),(2),(3),(4))は水域要素とみなし,計算 領域に含める.
- 各要素において1節点または2節点における全水 深*Hⁿ*が, ε以上となる水際要素(図-2要素(5),(6)) は計算領域に含める.



図-2 水域と陸域の判定

この判定を全要素に行うことにより、その時間ステップ での水域が要素ごとに判明する.3節点ともに全水深 が ε 以上の場合にはそのまま計算が進められるが、1 節点でも全水深が ε 以下の節点が存在する要素は、水 際の要素として扱う必要がある.水際要素は、水域の 境界を形成する要素となるので境界条件の定義が必要 である.ここでは、水深のない節点(図-2節点7,8) に $u_i^n = 0$ を与えることを行う.

2.5 流体力評価法

本研究では時間ステップごとに計算された流速と水 深を用いて,式(1)にGalerkin法に基づく有限要素法を 適用し,圧力(水位勾配)項L,粘性項Nに関する項 に対して部分積分を適用することにより導かれる式(8) の右辺の境界積分項から構造物に働く流体力を求める.

$$\int_{\Omega^{0}} \mathbf{U}^{*} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \bar{\mathbf{A}}_{i} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}_{i}} + \mathbf{G}\mathbf{U} - \frac{\partial^{2}}{\partial t \partial \mathbf{x}_{i}} (\mathbf{K}) - \mathbf{R}\right) d\Omega$$
$$+ \int_{\Omega^{0}} \left(\frac{\partial \mathbf{U}^{*}}{\partial \mathbf{x}_{i}}\right) \cdot \left(-\mathbf{L}_{i}\mathbf{U} + \mathbf{N}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{x}_{j}}\right) d\Omega$$
$$= \int_{\Gamma_{in}} \mathbf{U}^{*}\mathbf{T} d\Gamma = \mathbf{F}$$
(8)

ここに,

$$\bar{\mathbf{A}}_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -u_{1}^{2} & 2u_{1} & 0 \\ -u_{1}u_{2} & u_{2} & u_{1} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{A}}_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -u_{1}u_{2} & u_{2} & u_{1} \\ -u_{2}^{2} & 0 & 2u_{2} \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{L}_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ c^{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ c^{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_{x} \\ f_{y} \end{bmatrix}$$

である.また, Ω^0 は構造物周り一層分のメッシュにより構成 される領域である(図-3参照).各計算ステップにおいて求 めた流速と水深を,上式の左辺に代入することにより構造物 に働く流体力 F が求まることになる.なお, f_x , f_y は,x方 向およびy方向の流体力である.このように,構造物近傍に おける支配方程式の弱形式から,構造物に作用する流体力を 算定する点が本手法の特徴である.



図-3 流体力の計算

(a) (b) (C) (d)

2.6 構造物倒壊手法

本研究では,建物の倒壊を考慮した解析を可能とするため, 以下に示す建物倒壊アルゴリズムを導入する.

- 図 4-a のような構造物が流れ場に存在すると仮定する.
- 図 4-b のように構造物内部もあらかじめ有限要素分割を 行う。
- 構造物の境界は壁面と仮定して境界条件 (slip もしくは nonslip 条件)を与える(図4-c).
- 各時間ステップにおいて構造物に働く流体力を計算し、 定めた各構造物の倒壊にいたる流体力(コンクリート 造,木造,etc.)を超えたとき,その構造物は倒壊と判 定し,構造物内部も解析領域に含め,構造物周りの境界 条件を Free として解析を行っていく(図 4-d).

また,建物の倒壊を考慮する上で建物の倒壊判定の指標が必 要になってくるが,それらの研究には数多くの実験や調査が 行われている¹⁴⁾¹⁵⁾.

2.7 解析アルゴリズム

前述までの解析手法による計算の流れをまとめると,図5 に示すフローチャートのようになる.以下にその手順を示す.

- 解析領域全体を構造物内も含めて有限要素分割し,境界 条件,初期条件,計算条件を入力する.
- 水域要素,水際要素,陸域要素を判定し,計算領域の決 定を行う.
- 離散化された運動方程式,連続式を解き,流速,水深を 求解する.
- 求めた流速,水深を用い,構造物に作用する流体力を求 める.
- 求めた構造物に作用する流体力から抗力を求めて,構造 物の倒壊判定を行う.
- 時間進行を行い,時間ステップが終了するまで計算を繰 り返す.

図-4 建物倒壊アルゴリズム

データ入力	
初期条件の入力	
形状関数の計算	

```
DO istep = 1, nstep
```

計算領域の決定(水域,水際,陸域要素) 安定化パラメータの計算 流速および水深の求解 (運動方程式および連続式)

建物に働く力の算出

```
IF( 建物倒壊の判定 ) THEN
 建物周りの境界条件 Free
ELSE
 建物周りの境界条件 Not Free
```

解析結果の出力 ENDDO

図-5 解析フローチャート

3. 数值解析例

3.1 孤立波遡上問題

津波の砕波, 遡上問題に対しての本手法の妥当性の検討を 行うため, Synolakis による水理実験モデル¹¹⁾¹²⁾を取り上げ る. 解析モデルを図-6 に示す. 斜面勾配は, 1:19.85, L は孤 立波の半波長 $(L = (\frac{4h}{3\zeta_0})^{\frac{1}{2}} Arccosh((\frac{1}{0.05})^{\frac{1}{2}}))$ であり, $\zeta = 0.3m$, h = 1.0m の波高水深比 0.3 の孤立波である.水理実験を考 慮し,マニングの粗度係数n = 0.01s/m¹ とした.なお,x



図-7 各無次元時刻における計算結果と実験値の比較

方向分割幅 0.005m, y 方向分割幅 0.005m, 微小時間増分量 ∆*t*=0.005sec とした.



図-6 Synolakis による水理実験モデル

非碎波:
$$\frac{R_{max}}{h} = 2.831(cot\beta)^{-\frac{1}{2}}(\frac{\zeta}{h})^{\frac{5}{4}}$$
 (9)

砕波:
$$\frac{K_{max}}{h} = 0.918(\frac{\zeta}{h})^{0.606}$$
 (10)

図-7 において,波高水深比 0.3 での無次元化した各時刻 $(t' = t(\frac{s}{h})^{\frac{1}{2}} = 15,20,25,35,40,60)$ における波形の実験結 果と計算結果との比較を示す.非線形長波方程式による結果 (図中の凡例の shallow water eq.)では,非線形性のみ考慮 しているため,波が前傾化し,実験値と異なっており,遡上 高も実験値に対して過小評価していることがわかる.一方, Boussinesq方程式では(t' = 20)の砕波領域において実験値に 対してやや過小評価し,砕波の表現には課題が残るものの, 波の伝播,遡上は実験値とも良い一致を示し,現象を精度良 く表現できていることがわかる.また図-8 は孤立波の入射



図-8 孤立波の最大遡上高の計算結果と算定式の比較

波高に対する遡上高を計算し, Synolakis が提案した算定式 ¹¹⁾(9)(10) と比較したものである.図-8より非砕波領域,砕 波領域ともに,本計算結果は算定式とよい一致を示している ことがわかる.

3.2 建物を有する津波遡上問題

本手法の津波の遡上,流体力問題への妥当性の検討を行う ため,建物を有する津波遡上問題¹³⁾を取り上げる.実験は防 衛大学校水工学研究室によって実施されたものである.図-9 に,解析モデルを示す.幅7m,長さ11mの平面水槽であり, 波の浅水変形から遡上までを再現する.入射波は実験での造 波板の移動速度の時刻歴をx方向の線流量として入力する. 建物模型は護岸から0.2mの位置にあり,縦×横は0.1×0.1m



図-9 水理実験モデル



図-10 各地点における水位変動量の時刻歴

の角柱である.また建物前面に障害がある問題も取り上げ, 障害は護岸から 0.2m,建物は 0.6m の位置にある.水理実験 を考慮し,マニングの粗度係数 n = 0.01s/m^{1/3} とし,微小時 間増分量は 0.005sec とした.有限要素分割は非構造格子(総 要素数 89,313,総節点数 44,991)を用い,建物周りは海域に



図-11 波の遡上と建物に作用する流体力(抗力)

比べ,細かなメッシュ(約2.5cm)を設定した.

図-10 において,各地点(P1: x=-3.8m,P2: x=-2.3m,P3: x=-1.25m,P4: x=-0.75m)における水位変動量の時刻歴の実 験結果と計算結果の比較を示す.図-10より,砕波帯内にお いては実験値と若干の差異はみられるものの,波の伝播,非 線形性の影響による波高増幅,砕波による波高減衰を精度良 く表現でき,実験値とも良い一致を示していることがわかる. また図-11において,建物に働く流体力(抗力)の時刻歴の 実験値と計算結果の比較を示す.なお,実験値は3回の平均 値を用いている.図-11において,波の衝突が実験値に比べ 若干遅れているが,流体力(抗力)は実験値と良い一致を示 していることがわかる.波の遅れの原因については,構造物 の前面の護岸部分での越波現象を本計算モデルが正確に再現 できていないことが考えられるが,今後の課題としたい.

3.3 建物群を有する津波遡上問題

本手法の実問題への適用として,実地形における建物群を 有する津波遡上問題を取り上げる.解析対象は太平洋沿岸の



図-12 解析モデル



図-13 建物周辺の有限要素分割図



図-14 入射波条件

実在する集落地域であり、今後発生が懸念されている東南海・ 南海地震による津波を想定した.図-12 に解析モデルを示す. なお、解析モデルの作成は、標高データは 10m メッシュの標 高数値地図を、構造物データについては紙地図をラスター・ ベクター変換して数値地図化を行った後、GIS ソフトを用い て行った.有限要素分割は標高メッシュ点と各構造物境界の 節点を用いて修正 Delaunay 法により作成した三角形の非構 造格子(要素幅約 5m,総要素数 261,171,総節点数 130,794) を用いた¹⁶⁾.また本研究では建物倒壊を考慮するため、建物 を木造とコンクリート造に分け、その際用いる倒壊判定には 表-1 に示す飯塚らの指標¹⁵⁾を用いた.なお、本例題の場合に は、流れの方向が任意となるので、単位長さあたりの流体力 f_x , f_y の合力が指標の値を超えた場合に倒壊すると仮定した。

境界条件としては,図-14 に示す広領域を用いて計算された水位の時系列結果を境界条件として与えた.図中,薄い灰色がコンクリート造を仮定した建物であり,この集落はほとんどが木造となっている.また,マニングの粗度係数はn = 0.04 s/m^{1/3},微小時間増分量は 0.05 sec とした.

図-15 に計算結果として,各時刻における津波遡上と建物 の倒壊の様子を示す.図より,津波が防波堤を乗り越え,陸 上へ遡上していることがわかる.そして木造はすぐ倒壊して いるのに対してコンクリート造はしばらくの間持ちこたえ, 設定した指標の値を超えた段階で倒壊していく様子が確認さ れた.これにより,本手法は実地形での建物の倒壊を考慮し た津波遡上解析が可能であることがわかる.

表-1 家屋の構造別の倒壊に至る抗力

家屋の種類	抗力[KN/m]
コンクリート造	332.0
木造	27.4











4. おわりに

本研究では,波の遡上現象及び構造物に働く流体力を正確 に評価可能で,かつ建物の倒壊も考慮可能な津波の数値解析 手法の構築を目的とし,安定化有限要素法に基づく手法の構 築を行った.数値解析例として,孤立波遡上問題,建物を有 する津波遡上問題,実地形における建物群を有する津波遡上 問題を取り上げ,実験結果等との比較を行うことにより,本 手法の妥当性と有効性の検討を行った.その結果,以下の結 論を得た.

- 本手法は波の伝播,砕波,遡上現象を精度良く表現可能であり,実験値と良い一致を示し,本手法の妥当性と有効性が確認された.
- 流体力の評価手法は,実験値と概ね良い一致を示し,本 手法の妥当性と有効性が確認された.ただし,波の到達 時間については,若干の差異が見られた.この点につい ては,今後の課題としたい.
- 建物の倒壊アルゴリズムを導入して実際の地域に適用した結果,本手法は建物の被害状況を評価可能な解析手法であることが確認された.

謝辞

本研究を進めるにあたり,防衛大学校藤間功司教授,鴫原 良典助教より貴重な実験データの提供とご助言を賜った.こ こに,記して感謝の意を表します.

参考文献

- 小谷美佐,今村文彦,首藤伸夫:GIS を利用した津波遡 上計算と被害推定法,海岸工学論文集,第45巻,pp. 356-360,1998.
- 2) 油屋貴子, 今村文彦: 合成等価粗度モデルを用いた津波 氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 276-280, 2002.
- 3) 劉暁東,堺茂樹,小原忠和,三上勉,岩間俊二,今村文 彦:市街地への津波遡上・氾濫に関する数値解析,海岸 工学論文集,第48巻,pp.341-345,2001.
- 4) 鴫原良典,今村文彦:非線形分散波理論の津波数値解析 への適用性と新しい数値モデルの提案,海岸工学論文集, 第51巻,pp.6-10,2004.
- 5) 後藤智明: アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方 程式, 土木学会論文集, 第351号, pp. 193-201, 1984.
- T.E. Tezduyar: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advance in Applied Mechanics*, 28, pp. 1-44, 1991.
- T.E. Tezduyar, M. Senga : Stabilization and shock-capturing parameters in SUPG formulation of compressible flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* , pp. 1621-1632, 2006.
- M. Kawahara and T. Umetsu : Finite element method for moving boundary problems in river flow, *International journal for Numerical Methods in Fluids* 6, pp. 365-386, 1986.
- 9) 高瀬慎介,田中聖三,樫山和男:移動境界を有する浅水

長波流れ解析のためのバックグラウンドメッシュに基づ くメッシュ再構築手法,応用力学論文集,土木学会,10, pp.193-200,2007.

- 10) 岩瀬浩之,深澤雅人,後藤智明:ソリトン分裂の砕波変 形に関する水理実験と数値計算,海岸工学論文集,第48 巻,pp.306-310,2001.
- 11) C.E. Synolakis : The runup of solitary wave , *Journal of Fluid Mechanics* , 185 , pp . 523-545 , 1987.
- 12) V.V. Titov and C.E. Synolakis : Modeling of breaking and nonbreaking long-wave evolution and runup using VTCS-2, *Journal of Waterways*, *Port*, *Coastal and Ocean Engineering*, *ASCE*, 121(6), pp. 308-316, 1995.
- 13) チャルレスシマモラ,鴫原良典,藤間功司:建物群に作用する津波波力に関する水理実験,海岸工学論文集,第 54巻,pp.831-835,2007.
- 14) 松冨英夫,首藤伸夫:津波の浸水深,流速と家屋被害,海 岸工学論文集,第41巻,pp.246-250,1994.
- 15) 飯塚秀則,松冨英夫:津波氾濫流の被害想定,海岸工学 論文集,第47巻,pp.381-385,2000.
- 16) 今井大樹:建物・微地形を考慮した津波遡上解析のための非構造格子分割システムの構築,中央大学卒業論文, p.57, 2009.

(2009年4月9日受付)