建物や捕捉工などの影響を考慮した 津波漂流物解析モデルの開発

野島 和也¹・桜庭 雅明²・小園 裕司³

¹正会員 日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: nojima-kz@n-koei.jp

²正会員 日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: sakuraba-ms@n-koei.jp

³正会員 日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: kozono-yj@n-koei.jp

2011年の東北地方太平洋沖地震では、津波に伴い多くの種類の漂流物が発生した。漂流物は衝突や滞留に伴う被害拡大の要因となり、津波の浸水範囲と合わせて被害の推定が必要である。本研究では、津波の浸水予測を行う方法を拡張して複数の種類の漂流物の移動を推定する数値シミュレーションモデルを開発した。本研究で開発したモデルは、様々な状況における力学的な挙動を従来の津波シミュレーションを拡張したモデルとして考慮が可能なものとなっている。適用例として、建物周辺の漂流物の挙動解析を行い、既往の実験結果の整合性を評価した。また、多種多数の漂流物を対象とした遡上域、建物および津波捕捉工などの影響を含めた解析を行った。これらの結果より、様々な物理機構を踏まえた漂流物挙動が従来の津波解析の拡張として算定できるものとした。

Key Words : 2D tsunami simulation, tsunami drift, distinct element method

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波では津波による浸水被害だけでなく、自動車、船舶およびコンテナなどが陸域で漂流物となって移動、衝突し、これに伴う被害が広範囲で発生した。この津波による各地での被害は津波の浸水だけでなく、衝突に伴う構造物の損壊、がれきの発生や油の流出による火災・延焼および船舶の座礁など様々な2次的な被害の発生が見られた。このような被害を鑑み、津波被害想定および対策を検討するにあたっては、漂流物の種別を踏まえた浸水域での移動・滞留状況を推定することが重要である。津波漂流物被害の予測を行うにあたり、最近では関連のガイドライン¹⁾が公表されるようになり、具体的な漂流物被害の推定および対策指針が示されている。また、漂流物の移動を予測する方法として、従来の2次元の津波シミュレーションの結果を用いて漂流物を質点系の運動として仮定する方法^{2,3)}、同様の結果から漂流物を剛体として扱い運動過程を表現する方法^{4,5)}、また流体運動を含めて3次元解析で行う方法⁶⁾などが提案されている。2次元計算結果から漂流物の運動を解析する方法は広範囲における漂流物の移動過程を表現する方法として適しており、実務的に有力な方法

であるが、水域・陸域での摩擦を考慮した移動や建物への衝突に対しては近似的な取り扱いとなっている。一方、3次元解析による方法は、漂流物の形状や様々な物理過程を厳密に取り扱うことが可能であるが、計算量が膨大になるために、計算範囲の設定や計算機資源に対して制約があるのが現状である。津波に伴う漂流物挙動を推定するためには、できるだけ広い対象範囲で様々な種類、形状を表現しつつ、構造物や漂流物の物理的な条件を踏まえることが望ましい。

本研究では、従来の2次元の津波シミュレーションモデルを拡張して、構造物等への衝突および遡上域での摩擦の影響を表現できるモデルを開発した。本モデルは、津波に関する流体運動と漂流物運動の相互干渉を考慮でき、地形や構造物の影響による衝突、座礁の影響が考慮できる。漂流物は個別要素による集合として表現しているため、様々な大きさや重量を設定できる。また、従来から用いられる2次元の津波シミュレーションのデータを活用できる。本研究で開発したモデルを既往の実験検討との比較を行いモデルの妥当性を示した。更に、応用例として、多種・多数の漂流物に対し構造物や津波捕捉工などの影響を踏まえた解析を行い、提案したモデルの適用性を考察した。

2. 計算手法

(1) 津波シミュレーション

津波の伝播および浸水の数値シミュレーションには Leap-Frog法に基づく差分法を適用した⁷⁾。なお、本研究では、津波と漂流物の相互干渉効果を取り入れるために、基礎方程式の浅水長波方程式の運動方程式に漂流物から受ける流体力項（式(2),(3)の右辺第3項）を考慮した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - F_{\tau_{bx}} - F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - F_{\tau_{by}} - F_y \quad (3)$$

ここに、 η , M , N , D は、それぞれ、水位、 x 方向流速、 y 方向流速、全水深であり、 $F_{\tau_{bx}}$, $F_{\tau_{by}}$ は底面摩擦、 F_x , F_y は、漂流物から受ける力を示す。流体力項は計算格子のひとつのセルに注目すると次の様に表すことができる。

$$F_x^{cell} = \sum_{k=1}^{N_p^{cell}} w_k F_{fx}^k / dA, \quad F_y^{cell} = \sum_{k=1}^{N_p^{cell}} w_k F_{fy}^k / dA \quad (4)$$

ここに、 N_p^{cell} はセル近傍にある漂流物要素の数、 F_{fx}^k , F_{fy}^k は後述する漂流物が流体から受ける力の x 軸、 y 軸成分、 w_k は漂流物の寄与度を表す重み関数、 dA は計算セルの面積である。

$$\begin{cases} w_k = \frac{dx - |\xi|}{dx} \cdot \frac{dy - |\zeta|}{dy} & : |\xi| \leq dx \text{ かつ } |\zeta| \leq dy \\ w_k = 0 & : |\xi| > dx \text{ または } |\zeta| > dy \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 ξ , ζ はセル中心を原点とした漂流物要素の座標、 dx , dy はセルの大きさを示す。図-1に示すような漂流物要素 $k=1$ では w_k は1.0となり、漂流物要素からの力は全てセル (i, j) にかかる。隣接するセル $(i, j+1)$ との中間に位置する $k=2$ では w_k は0.5となる。また、この場合は N_p^{cell} は6となる。

(2) 漂流物の挙動解析

漂流物は円柱状の複数の漂流物要素の集合として表現し（図-2参照）、個別要素法により挙動を計算した。個別要素は法線・接線方向に対しバネ・ダッシュポッドモデルとして漂流物の弾性変形を考慮した。鉛直方向の力は浮力のみ考慮し、鉛直移動も可能とした。漂流物の影響により生じる流体力を浅水流モデルの運動方程式に反力として反映し、流体と漂流物の相互干渉効果を取り入れた。

a) 運動方程式

図-1 漂流物と計算点の位置関係

図-2 漂流物モデルの概念図および個別要素の定義

個々の漂流物要素の挙動は以下に示す運動方程式を用いて予測する。

$$m \frac{\partial u_t}{\partial t} = F_{fx} + F_{hx} + F_{bx} + F_{sx} + F_{cx} + F_{rx} \quad (6)$$

$$m \frac{\partial v_t}{\partial t} = F_{fy} + F_{hy} + F_{by} + F_{sy} + F_{cy} + F_{ry} \quad (7)$$

ここに、 m は各要素の質量、 u_t , v_t は漂流物の x 軸方向、 y 軸方向の速度、 F_{fx} , F_{fy} は津波挙動により生じる流体力、 F_{hx} , F_{hy} は静水圧により流体から受ける力、 F_{bx} , F_{by} は摩擦力の x 軸、 y 軸成分、 F_{sx} , F_{sy} は地形勾配と重力により受ける力、 F_{cx} , F_{cy} は接触力、 F_{rx} , F_{ry} は漂流物内部のせん断変形による力である。

b) 津波挙動による流体力

動水により漂流物が津波から受ける力（流体力）は、Morison式で表現し、以下のようになる。

$$F_{fx} = \frac{1}{2} \rho_f C_d A_x (u - u_t) \cdot |u - u_t| \quad (8)$$

$$F_{fy} = \frac{1}{2} \rho_f C_d A_y (v - v_t) \cdot |v - v_t| \quad (9)$$

ここに、 C_d は抗力係数、 A_x , A_y は漂流物要素の水没部分の x 軸方向、 y 軸方向の投影面積、 u , v および u_t , v_t はそれぞれ、流体の流速の x 軸、 y 軸成分、および、漂流物要素の移動速度の x 軸、 y 軸成分、 ρ_f は流体の密度を示す。

c) 静水圧

流体力は、流体と漂流物各要素の相対速度により力が表現されるため、漂流物が静止している状態では力が生じないことになる。長さを持つ漂流物が水位差のある場所で静水圧を受ける場合、その差により力が生じる。静水圧は漂流物の表面上に内向き法線方向に働くものとし、静水圧により漂流物要素に働く力は下記の式より求める。

図-3 漂流物要素の鉛直位置と静水圧による力

図-4 静水圧の作用方向と外向き単位法線ベクトル

図-5 斜面上の漂流物に働く力

$$\begin{cases} F_h = \frac{1}{2} \rho_f g h_w A \cdot n & : h_w \leq \bar{h}_p \\ F_h = \frac{1}{2} \rho_f g (2h_w - h_p) A \cdot n & : h_w > \bar{h}_p \end{cases} \quad (10)$$

$$F_h = \{F_{hx}, F_{hy}\}, \quad n = \{n_x, n_y\} \quad (11)$$

ここに、 F_h は静水圧による流体力ベクトル、 n は外向き法線ベクトル、 h_w は水面から漂流物要素の最低地上高を除く底面までの高さ、 $\bar{h}_p$ は最低地上高を除く要素の高さである(図-3 参照)。最低地上高は、車両のタイヤや貯蔵タンクの脚などの浮力が働かない部分の高さである。単位法線ベクトルの成分は図-4 に示す関係を用いて次式より求めることができる。

$$n_x = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{L}, \quad n_y = -\frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{L} \quad (12)$$

d) 浮力

漂流物の鉛直位置は漂流物の重心における漂流物総重量と全漂流物要素の浮力の総和のつり合から求める。各漂流物要素に働く浮力は、次式で計算する。

$$\begin{cases} F_v = \rho_f g h_w \pi r^2 & : h_w \leq \bar{h}_p \\ F_v = \rho_f g \bar{h}_p \pi r^2 & : h_w > \bar{h}_p \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 r は要素の半径、 h_w 、 $\bar{h}_p$ は前項で示す通りである。

e) 地形勾配により生じる力

傾斜のある地面の上では、図-5 に示すように漂流物には斜面の接線方向成分の力 W_s が生じる。接線方向に働く力の水平方向成分を求めて、 x 軸方向と y 軸方向に分解することで、地形勾配により漂流物に働く力とする。地形勾配により漂流物要素に働く力の x 軸方向および y 軸方向の成分は、次の式より求められる。

$$F_{sx} = -W_h \cdot \cos \varphi, \quad F_{sy} = -W_h \cdot \sin \varphi \quad (14)$$

ここで、 φ は x 軸と最急勾配方向とのなす角度である。

f) 地面との摩擦力

底面摩擦力は図-5の地面に平行に働く力である。摩擦力は漂流物の移動状況により動摩擦力と静止摩擦力に分けて考える。静止摩擦力は、次の式で求める。

$$\begin{cases} F_b = -\frac{F}{|F|} \mu_s W_n & : |F_b| < |F| \\ F_b = -F & : |F_b| \geq |F| \end{cases} \quad (15)$$

ここに、 μ_s は静止摩擦係数、 F は静止摩擦力を除く漂流物要素に作用する外力の総和である。静止摩擦力は F と逆向きに働き、また、 $|F|$ よりも大きくならないものとする。動摩擦力は、次式より求める。

$$F_{bx} = -\frac{u_t}{|u_t|} \mu_d W_n, \quad F_{by} = -\frac{v_t}{|v_t|} \mu_d W_n \quad (16)$$

ここに、 μ_d は動摩擦係数であり、動摩擦力は要素の移動方向に対して逆向きに働く。

g) 漂流物要素間力

漂流物の個別要素の要素間力の算出はバネとダッシュポットのモデル(図-2 参照)で表現し、軸方向に働く力は次式のとおりバネ力 F_e とダッシュポットによる力 F_d の総和になる。

$$F_{cx} = -\sum (F_e + F_d) \cdot (x_j - x_i) / L_{ij} \quad (17)$$

$$F_{cy} = -\sum (F_e + F_d) \cdot (y_j - y_i) / L_{ij} \quad (18)$$

バネ力 F_e およびダッシュポットによる力 F_d は、要素間の距離と相対速度を用いて、次式により算出する。

$$F_e^{t+\Delta t} = k \cdot (L_{ij}^0 - L_{ij}^t) \quad (19)$$

$$F_d^{t+\Delta t} = c \cdot \Delta u \quad (20)$$

ここに、 t は時間、 Δt は時間増分量、 Δu は要素 i と j 間の相対速度、 k は弾性係数、 c は減衰係数、 L_{ij}^0 、 L_{ij}^t は要素が接している状態、時間 t における要素中心間の距離である。

h) 漂流物内の要素間力

漂流物内における要素間力には軸方向の力の他に、漂

図-6 せん断変形モデルと変形により生じる力

流物のせん断変形に対する復元力として、せん断方向の力を考慮する。せん断方向の力は、図-6 に示すバネ・ダッシュポットヒンジモデルを用いて表現し、バネ力 F_{re} およびダッシュポットによる力 F_{rd} の総和より求める。

$$F_r = - \sum (F_{re} + F_{rd}) \quad (21)$$

また、せん断による力は、要素 i および隣接する 2 つの要素に加える。バネ力 F_{re} およびダッシュポットによる力 F_{rd} は、要素 i の位置での曲げ角と角速度を用いて、次式により算出する。

$$F_{re}^{t+\Delta t} = k_r \cdot (\theta_i^0 - \theta_i^t) \quad (22)$$

$$F_{rd}^{t+\Delta t} = c_r \cdot \omega_i \quad (23)$$

ここに、 ω_i , θ_i^0 , θ_i^t は要素 i における曲げ速度、初期曲げ角、時刻 t における曲げ角、 k_r , c_r は曲げに対する弾性係数と減衰係数、 θ_i^0 , θ_i^t を示す。

3. 数値解析例

(1) 陸上遡上津波に対する建物周辺の漂流物の挙動

本研究で開発したモデルの妥当性を検討することを目的として、基本的な水路に構造物がある場合の漂流物の挙動解析を行った。対象とした水路は、図-7 上図に示すとおり、段波が陸上を遡上して漂流物が構造物に衝突するようなケースを設定した。入射波は水位差 8.0 m の段波とした。漂流物は 5 m × 2.5 m × 2.5 m の大きさとして半径 0.625 m、高さ 2.5 m の個別要素 8 個で表現し、遡上域に 10 個配置した (図-7 下図)。漂流物はその比重の違いにより挙動の違いがあるため、本件検討では、特に建物周辺での挙動を比較するために 3 種類の比重 (0.1, 0.5, 0.9) を条件とした。津波浸水解析の格子サイズは 2 m として、時間増分量は Δt は 5×10^{-6} 秒とした。

図-8 に比重が 0.5 の場合における建物周辺における水面形状と漂流物の挙動の時間変化を示す。複数の漂流物は、津波の遡上により移動が始まり、構造物に衝突する。衝突した漂流物は建物手前の水位のせり上がりと同時に、浮き上がり回り込んでばらつきを持ちながら移動する。なお、構造物は 2 次元の数値シミュレーションでは地形として表現しており、従来に用いられている建物の影響

水路全体

漂流物周辺

図-7 水路および漂流配置

図-8 建物周辺における津波水位変化と漂流物の挙動

図-9 建物周辺における漂流物の軌跡

を考慮した津波シミュレーションの地形データを活用しながら漂流物の移動過程を表現することができる。

図-9 に建物周辺における漂流物の軌跡を示す。この図より、漂流物が建物に衝突して広がるが見えてとれる。また、比重が 0.1 と 0.9 の場合を比較すると、比重 0.9 の場合は漂流物がスパン方向・流軸方向にやや広がりながら流下する。この傾向は、既往の実験⁸⁾と同等の傾向である。また、全ての比重の条件でも構造物に衝突してから、

図-10 水路および漂流物配置

不確定な挙動により回り込む傾向となった。

(2) 多種・多数の漂流物の挙動検討

次に現地スケールへの適用性を評価するために、複数の種類（船舶、車両）の漂流物と津波捕捉工・建物の影響を含めた計算を行った。水路および漂流物の配置は図-10に示すとおりであり、車両、船舶（大型、中型、小型）を対象として捕捉工の有無の両方を比較した。入射波は段波として、水位差2mとした。陸域には立方体の建物を配置して、その中に車両を複数台配置した。海域では、大型、中型、小型船舶を配置した。それぞれの漂流物の形状、大きさは実際の大きさを仮定し、図-10の下図のようにした。漂流物捕捉工は漂流物と同様に円柱の個別要素によりモデル化を行い、漂流物との衝突を考慮できるようにした。支柱の高さは6m、支柱間高さは2mとした。津波浸水計算の格子サイズは2m、時間増分 Δt は 5×10^{-5} 秒とした。弾性係数 k および減衰係数 c は、それぞれ 5×10^{-9} 、 5×10^{-14} を用いた。回転に関するバネ定数 k_r および減衰定数 c_r は、 1×10^{-10} 、 1×10^{-9} を用いた。図-11に捕捉工を設置しない場合における各時刻（5秒後、8秒後、30秒後）の漂流物の移動状況を示す。ここで5、8秒後は押し波、30秒後は引き波による状況である。この結果より、押し波で多くの漂流物が遡上して、遡上先端に多くの漂流物が滞留することがわかる。大型船舶は建物手前で捕捉されるものが多いが、一部は建物をすり抜けていることもわかる。また、引き波では遡上先端に各種の漂流物が残ると同時に、多くの大型船舶が沖に戻ることもわかる。この傾向を比較するために著者らが質点系の運動により計算した方法による結果²⁾と比較した。

図-12に同じ時間帯による漂流物の移動状況を示す。8秒後（押し波）による結果を比較すると、本手法は漂流物の形状や建物や漂流物同士の衝突を考慮した計算である

図-11 各時刻における漂流物の挙動（捕捉工なし）

図-12 既往研究による計算結果²⁾

図-13 各時刻における漂流物の挙動（捕捉工あり）

図-14 5秒後における漂流物の状況（鳥瞰図）

ことから、特に大型船舶では、建物手前で滞留しており、既往の結果との差異が見られる。既往の計算結果は漂流物形状を定数で表現しており、全体的に押し波で押され

る状況になる。なお、小型船舶や車両はいずれの結果も遡上先端に近いところで漂流するが、本手法の方がその影響が顕著である。これは、遡上先端付近で摩擦の影響を受けながら遡上・停止を繰り返したためであると考えられる。既往の計算は、摩擦の影響を考慮していないため、一定の水深条件で漂流停止となり、本手法とは挙動が異なる。一方、引き波の結果を比較すると、本手法による結果は、遡上域に全体的に滞留する。これは、押し波と同様に遡上先端付近で摩擦の影響を受けた後、引き波により移動したものである。また、大型船舶は本手法による計算結果は縦横の形状を考慮した影響により流体力が様々な方向を受けるケースがあるため、沖に戻るものと遡上域に滞留するものに分かれる。既往の手法は、一律の形状であることから、ほぼすべての漂流物が沖に戻る傾向となる。

図-13に捕捉工がある場合の漂流物の平面分布状況を示す。捕捉工がある場合は、大型・中型船舶の多くは捕捉工により捕捉され引き波で沖合に流されている。このモデルは津波捕捉工も物理的に考慮しているため、従来のように捕捉工の通過条件を強制的に考慮するようなものでなく、限りなく物理過程に忠実に表現できるようになっている。図-14に建物および捕捉工周辺の津波と漂流物の挙動の鳥瞰図を示す。この結果より、建物の側面や上面にも漂流物が捕捉されるような3次元的な挙動が考慮できることも確認できる。

4. おわりに

従来の平面2次元の津波シミュレーションを用い、流体と漂流物の力の相互干渉を考慮した漂流物シミュレーションのモデルを開発した。開発したモデルは漂流物・構造物間の衝突、遡上等の影響を評価することが可能となっており、その妥当性を示すために構造物周辺での漂流物の移動軌跡の検証、多種・多数の漂流物に対する構造物への影響を考察した。その結果、以下の結論が得られた。

- 単体の建物周辺における漂流物の移動に対して、本研究で開発したモデルを適用した結果、漂流物の比重の違いによる影響を表現した。また、建物を回り込む特性の違いについても傾向を捉えることが可能となった。
- 複数の規模の船舶、車両が建物や津波捕捉工に対する影響を踏まえた漂流物シミュレーションを行った結果、建物や漂流物同士の衝突、座礁、乗り上げなどの現象を再現した。また、津波捕捉工の影響も物理的に再現することが可能となった。

今後の課題として、個々のもつ漂流物の衝突確率や衝突力の評価について検証することが挙げられる

参考文献

- 1) 水産庁漁港漁場整備部：漁港の津波漂流物対策施設設計ガイドライン（案），119p，2016.
- 2) 野島和也，桜庭雅明，小園裕司：津波バリアの影響を考慮した実務的な津波漂流物計算モデルの開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71, No.2, p I_283-I_288., 2015.
- 3) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算，第30回海岸工学講演会論文集，pp.594-597, 1983.
- 4) 橋本貴之，越村俊一，小林英一，藤井直樹，高尾誠：津波来襲時における船舶漂流・座礁モデルを用いた臨海都市域危険度マップの開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 66, No.1, pp.236-240, 2010.
- 5) 嶋原 良典，許 松，多田 毅：津波漂流物モデルの現地スケール問題への適用に関する考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.72, No.2, p.I_427-I_432, 2016.
- 6) 米山 望，永島 弘士：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, P, 266-270, 2009.
- 7) 後藤智明，小川由信：Leap-Frog 法による津波の数値計算法，東北大学土木工学科資料，52p, 1982.
- 8) 甲斐田秀樹，木原直人，陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.72, No.2, pp.I_1159-I_1164, 2016.

(2017.3.15 受付)

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE TSUNAMI DRIFTS ANALYSIS CONSIDERING EFFECTS OF STRUCTURES AND TSUNAMI BARRIER

Kazuya NOJIMA, Masaaki SAKURABA and Yuji KOZONO

In this study, we developed the model for tsunami drifts analysis considering effects of structures such as buildings and tsunami barriers. The developed model can consider the interaction between tsunami drifts and tsunami propagation. The model can also be considered behavior of the tsunami drifts at a wide variety of situation and can be extended based on 2-dimensional tsunami simulation model. As the example of application, we applied for a analysis of behavior of tsunami drifts around a building to estimate the validity of developed model and applied for a variety of tsunami drifts around structures. From these results, the delveloped model can estimate a wide variety tsunami drifts behavior by using extended tsunami simulation model.