

流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析

安田 誠 宏*・平石 哲 也**・永瀬 恭 一***・島田 昌 也****

都市臨海部は高度に開発されており地下施設が存在する場合もあるため、構造物による影響を粗度として取り扱うだけでは不十分であり、3 次元的な浸水リスクの解析が必要と考えられる。本研究では、MARS 法を応用した高精度な浸水リスク解析手法を提案し、臨海都市部を対象にその有用性を検討した。解析の結果、地上と地下の浸水状況を同時に再現できることを確認した。また、浸水状況の解析結果を CG によって人の視点で可視化することもでき、危険度の理解が容易になる。さらに、地図データベースと土地利用状況情報を入手できれば、各都市の臨海部において、家のサイズまで認識可能な精度での浸水リスク予測が可能である。

1. はじめに

高潮・津波災害は地域によって決定される再現期間を有するものであり、近年その発生確率が高まっている箇所が全国に広がっている。したがって、臨海部における受忍および受容可能な浸水リスクを正しく評価し、被害を抑止・軽減することが重要である。従来の高潮による浸水リスク解析には、越流高さや地盤高から簡易的に浸水域を求めるレベル堪水法や、2 次元浅水長波モデルによる平面計算が用いられているが、構造物による影響は背後地の土地利用や建物の被覆率を考慮して底面粗度を変化させるにとどまっている。津波による陸上への遡上解析においても、相田 (1977) による Manning 粗度を一様に与える計算法や、津波に対する家屋の抵抗をモデル化して土地利用毎に粗度を設定する方法 (小谷ら, 1998) が一般的である。都市臨海部は高度に開発されており地下施設が存在する場合もあるため、構造物による影響を粗度として取り扱うだけでは不十分であり、3 次元的な浸水リスクの解析が必要と考えられる。

数値解析技術の発展と電子計算機の飛躍的な進歩に伴い、3 次元的な解析を目的とした CFD (Computational Fluid Dynamics) 技術が海岸・港湾構造物の実務においても活用されつつある (例えば、磯部ら, 1999)。従来より、自由表面を有する流体解析または多相流の直接解析には、流体体積率を用いた VOF 法 (Volume Of Fluid) が広く利用されている。VOF 法は、格子内の VOF 値をドナー・アクセプタ法を用いて隣接格子へ輸送し、界面形状を求める方法である。しかしながら、この解析手法は界面勾配を考慮していないため、界面形状を正しく捉えることができない。一方で、功刀 (1997) が開発した自由表面を含む多相流の直接解析法 (MARS 法: Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) は、界面勾配を考慮した VOF 値の輸送と格子界面での

VOF 値の連続性を保障することで、精度よく界面形状を捉えることができる。本研究では、この MARS 法を組み込んだ汎用流体解析ソフト STREAM を応用し、臨海都市部を対象に高精度な浸水リスク解析を行い、その有用性を検討した。

2. 都市モデルの構築

複雑な都市の形状を、解析プログラム上で再現するためには、大量な地形測量データを入力する必要があるが、従来の測量やデータ入力手法を用いて、本研究のような 3 次元の都市モデルを構築することは容易ではない。そこで、データ量が大きく入力が煩雑であった地形や構造物のデータについて、航空測量を用いたデータベースと都市計画図や設計時に作成した CAD データを加工し、簡単に解析モデルに取り込む手法を開発した。

(1) VOS モデル

複雑な都市モデルを構築する際に、従来の手法では計算格子を横断するように構造物を設置することができず、格子面に沿う形状にデフォルメされてしまうという問題点があった。そこで、この問題を解消するために固相体積率 (VOS: Volume Of Solid) モデルを利用する。

VOS モデルによる形状表現は、格子内部に存在する VOS 値と格子境界上の面積率を用いて行われる。これにより、地形データと構造物データをそのまま解析領域内に配置でき、形状を忠実に再現できる。具体的には、地形データと構造物データをそのまま解析領域内に配置するが、その際生じる構造物表面と解析領域との関係は、図-1 に示すように、格子内部に存在する固体の占有率 (VOS) と格子境界面上の面積率を用いることで明確に区別することができ、形状を忠実に再現することができる。また、計算領域と計算格子を一切変更せずに、地形および構造物データを入れ替えるだけで、精度の低下を招くことなく、様々なケースを解析することができる。

構造物情報や地形情報を、自動的にこの解析手法に入力できるように変換する手法を開発することによって、従来の人手に頼った入力方法では、煩雑なため困難で

* 正会員 博 (工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** 正会員 工 博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
*** 正会員 博 (工) (株) フジタ 技術研究所 コンサルタント部
**** 工 博 (株) ソフトウェアクレイドル 技術部

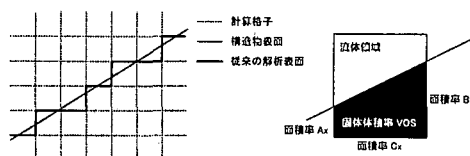


図-1 解析格子内での表面の表現および流体・固体領域の関係

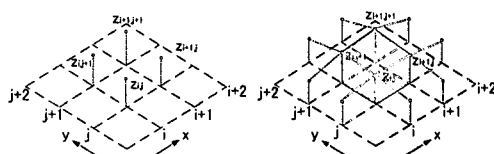


図-3 DEM データの3次元モデルへの変換

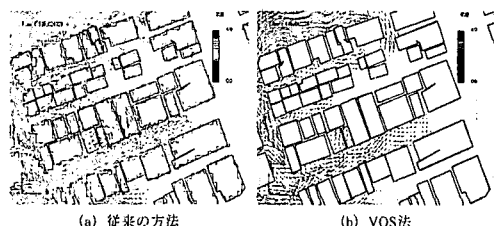


図-2 VOS モデルによる解析精度の向上

あった形状の入力が可能になるとともに、解析精度の大幅な向上が期待できる。計算結果の一例を図-2に示す。従来の方法では、構造物が直交格子に合わせてデフォルメされたことにより、流況に乱れが生じてしまっている。一方、VOSモデルによる結果では、構造物の周りの流れはスムーズに再現されており、精度の向上がみられる。

(2) 地形情報の構築方法

複雑な都市の地形を解析プログラム上に再現するために、航空測量によって得られた地形データベースを利用する。このデータは、航空機よりレーザー波を地上に照射して、その反射波を解析するレーザースキャナによって得られるものである。地上のGPS基準局と航空機に搭載したGPS/IMU(ジャイロ)により、航空機の位置を正確に把握でき、地形の標高を概ね2m間隔で、水平精度±30cm鉛直精度±15cmで得ることができる。

この方法で得られたデータは、表層データ(DSM: Digital Surface Model)とよばれ、建物の形状や樹木等からの反射データも含まれている。本研究では、地形の形状とビルなどの詳細な形状を含んだ都市モデルを構築して氾濫計算を行うのが目的であり、構造物などのデータは別の手法によって構築するため、地表面以外のデータを除去することによって等間隔な地形だけの標高データ(DEM: Digital Elevation Model)を作成する。

以上のようにして得られた標高データを解析プログラムに入力するために、3次元データを作成する。標高データは、等間隔に得られた高さだけのデータであるが、本研究では地形の形状の表現にVOSモデルを用いるので、図-3のように、解析範囲の下端を底面、隣り合う4つの標高データを上面とした角柱形状のモデルとして、解析プログラムに入力できるようにデータを変換した。

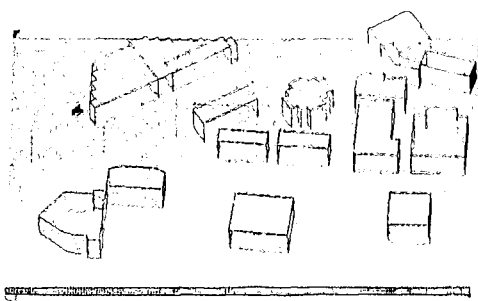


図-4 都市モデル

(3) 構造物データの構築方法

ビルなどの構造物のデータは、都市計画図や設計図などを参考にして作成する。前節で説明した、DSMモデルを利用することも可能ではあるが、航空機からのレーザープロファイラーで取得したデータでは、隅角部を始めとする構造物の輪郭部分が不明瞭であるため、解析の精度を低下させると考えられる。さらに、高架橋、歩道橋などの下の空間は認知できないため、解析において流れを阻害してしまうという問題が生じる。

近年、構造物の設計にはほとんどの場合でCADが用いられており、都市計画図なども電子化されているので、これらを利用する。まず、これらのデータから構造物の輪郭を抽出する。電子情報がない場合には、都市計画図をデジタイザーなどで読み込み輪郭を抽出する。

地形データと同様に解析プログラムへの入力のため、変換プログラムを作成して3次元化する。この場合には、構造物底面の高さは地形データのものとし、構造物上面はDSMデータ等で得られた構造物の高さとする。以上のような、地表面データと構造物のデータを解析プログラムに入力して重ね合わせると、図-4に示すような都市モデルを構築することができる。この都市モデルは、詳細な地形と構造物の形状を有しており、これまで用いられていた浸水を解析する手法と比較して、詳細な解析が可能になる。

(4) 地下モデルの構築方法

地下モデルについては、設計図もしくはCADデータを手入する必要がある。それを用いて地下空間の形状を解析プログラムに入力できるように構築した。地上の構造物のモデルを作成する場合には、構造物が存在する部分を表現すればよいが、地下構造物は必要な地下空間以

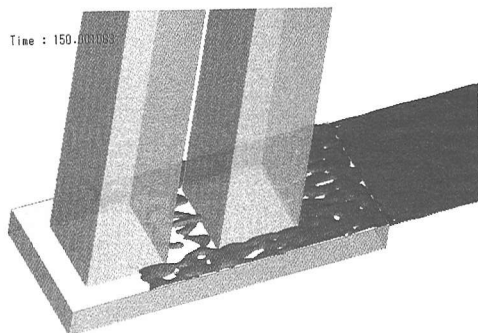


図-5 高層ビル

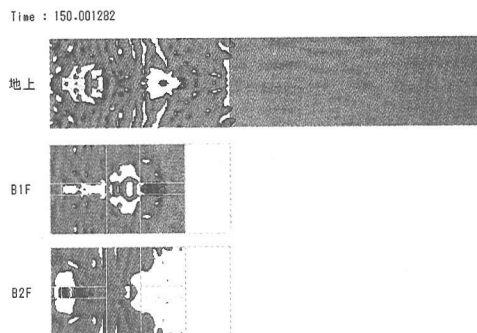


図-6 複層地下駐車場

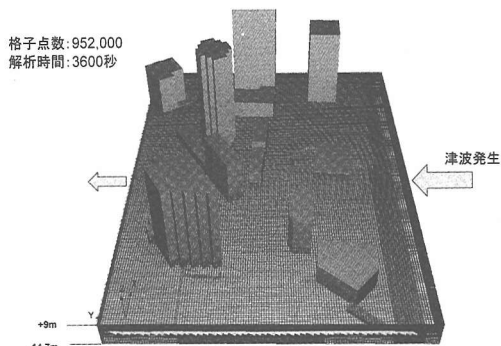


図-7 解析モデル

津波は解析領域の右側から流入させる。流入させる面が x 軸で、長さ 350 m である。 y 軸は境界から流入する流れを安定させるために、海域部分 20 m を加えた 270 m とした。鉛直方向は、地下駐車場の地下 2 F の底面である T.P.-14.7 m から T.P.+9.0 m までの 23.7 m とした。図-7 ではビル全体を表示しているが、解析は津波が進入する部分のみを解析領域とし、それより高い部分は画像表示のみである。

解析格子の間隔については、VOS モデルを用いるため、構造物の周辺で格子を細分化する必要性が低いので、 $\Delta x = \Delta y = 2$ m とした。鉛直方向では、護岸の越流部や駐車場入口部の形状の再現性が解析精度を左右するため、T.P.+2.0~4.0 m の間で $\Delta z = 0.25$ m とした。地下部分では、構造物のスラブ高などに配慮して間隔を決定した。以上のような格子分割を行った結果、要素数は $175 \times 136 \times 40 = 952,000$ となった。

解析条件は次の 2 ケースとした。

- ① 周期 $T=5400$ s, 波高 $H=4.0$ m, 潮位 T.P.+0.9 m
- ② 周期 $T=3600$ s, 波高 $H=4.0$ m, 潮位 T.P.+0.9 m

- 津波を流入させる境界条件は、以下の手法で設定した。
 - 1) 時刻より入力波形の水位 η_i を計算
 - 2) 流入境界部分の水位 η を抽出
 - 3) 流入線流量 Q_{in} を計算; $Q_{in} = (\eta_i - \eta) / D_1 + Q_{in-1}$
 - 4) 流入境界にあたる流速 U を計算; $U = Q_{in} / D$
- ここに、 D は底面から水面までの高さ、 Q は底面から水面までの流速の積分値である。

計算結果は、水面形や流速の動画作成が可能のように、流体体積率、流速、圧力のデータを 5 秒毎に抽出した。

(2) 地上における浸水状況

図-8 にケース①の $t=600 \sim 1000$ s における浸水範囲を、図-9 に粒子法による流況図を、それぞれ示す。浸水範囲は流体体積率 0.2 となる等値面の水面形を表示したものである。また、流況図は $t=0$ s において河道内に粒子を発生させた後に、それぞれの粒子が存在している場

外の部分を作成しなければならないので注意を要する。今回は、各階毎の形状を別々に作成して組み合わせた。

3. 基本的なモデルによる解析

本研究で検討対象としている地区は、市街地と地下が混在するところである。そこで、まず始めに基本的なモデルとして、地上の高層ビル街と地下駐車場をそれぞれ別々に検討することとした。図-5 および 6 は、 $H=2$ m, $T=60$ min の津波を、600 m 沖側の入射境界から入力した後の、150 秒後の解析結果である。

図-5 の高層ビルの場合をみると、ビルの背後に水塊が浸水している状況をうまく再現できている。また、図-6 の複層地下駐車場の場合についても、地下への浸水が再現できている。最下層の浸水深は約 1.8 m であった。

これで、ビル周辺の流れおよび地下への浸水を再現可能なことを確認できたといえる。そこで、ビルが密集し、地下駐車場がある臨海部モデル地区を対象にして、浸水解析を行った。

4. 浸水リスク解析

(1) 解析モデル

臨海部モデル地区を対象に、津波による氾濫解析を行った。作成した解析モデルを図-7 に示す。

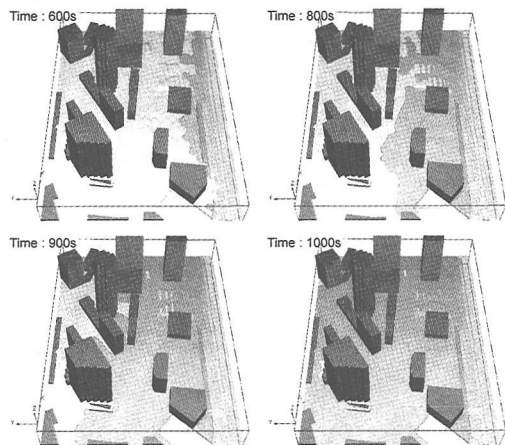


図-8 地上における浸水範囲の時間変化

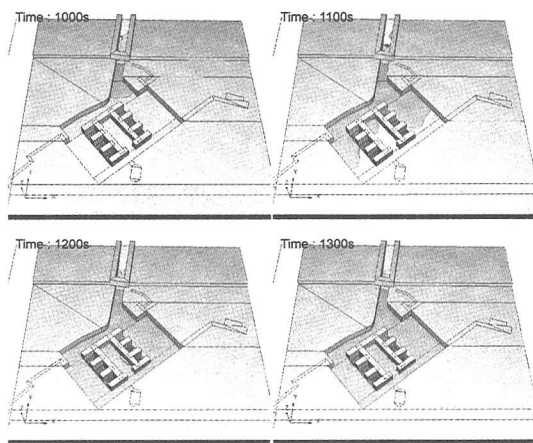


図-10 地下部分への浸水状況

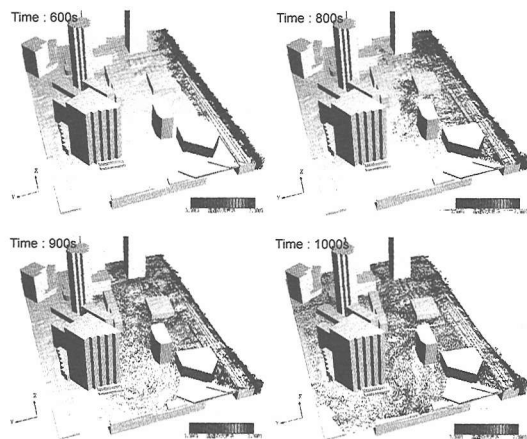


図-9 粒子法による流況

所での流速から移動量を算出し、順次移動させたものである。護岸部から越流を開始した時点から、解析領域の全域に浸水する時刻までを示している。これらの図から、護岸部からの越流開始から解析領域の全域が水没する間の、浸水状況や流れの経路を確認することができる。

$t=500$ sでは、護岸前面で水位はかなり上昇するものの、越流および浸水はまだ起こらない。 $t=550$ sに越流し始め、 $t=600$ sには護岸の大部分から越流し、護岸中央付近から背後の低地に落下している。この流れは、 $t=700$ sに道路部分に侵入した後、中央下方の地下駐車場がある交差点で、幹線道路に沿う左上方向と、地下駐車場入口の斜路のある左下方向へ分岐する。前者は、 $t=1000$ sに左側の自由流出境界から流出する。後者は、 $t=950$ sに地下駐車場の斜路付近に到達して、地下へ流入しはじめる。一方、護岸上方の水際公園から越流した流れは、そのまま直進してビル間の狭い道路を通過して $t=1000$ sに境界へ到達する。以上の3つの主な流れが浸水経路である

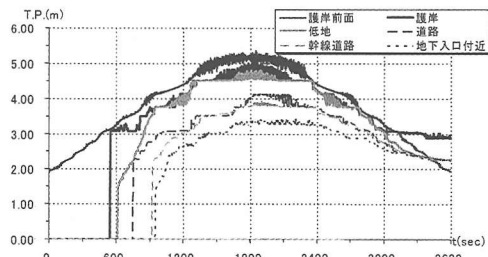


図-11 地上における浸水深

ことを明らかにできた。また、図-9の流況図によると、中央下方の交差点から左下の地下駐車場入口へ向かう流れが卓越していることがわかった。

(3) 地下における浸水状況

次に、地下駐車場への流入状況 ($t=1000\sim1300$ s) を表したのが図-10である。地上部の浸水状況と同様に、地下部への浸水が始まってから冠水するまでの経時変化を示した。 $t=950$ sで斜路からの流入が開始して、 $t=1000$ sになると斜路を下って地下1Fに到達している。 $t=1100$ sには、エレベータの開口部から地下2Fへの流入が始まっているが、斜路の反対側にはまだ浸水していない。 $t=1200$ sには地下1Fはほぼ全域が浸水して、 $t=1600$ sには地下1F、2Fとも完全に水没した。

(4) 浸水深

図-11に地上における水位の時間変化を示す。抽出点は護岸前面、護岸上、護岸背後の低地、ビル間の狭い道路、幹線道路および駐車場入口付近である。 $t=500$ sに護岸前面での水位が3.2m程度まで上昇して護岸部分の盛土より高くなると、護岸上での水位も急激に上昇しており、相関的な連動がみられる。その後、護岸背後の低地に浸水が始まり、 $t=900$ sに護岸との水位差がほとんどなくなる。この低地のT.P.は+1.2mであり、浸水深

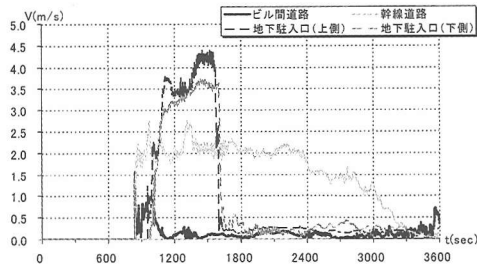


図-12 浸水流速

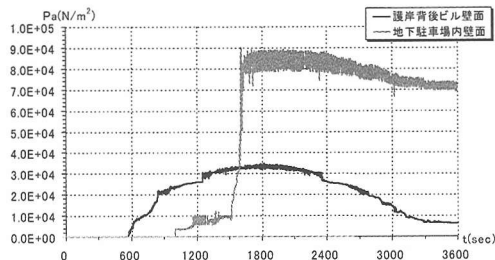


図-13 浸水流の流体圧

は3.0 m以上でかなりの深さといえる。道路上の水位を比較すると、ピークにおいて0.4 m程の差がみられる。道路の広さは約2倍異なるため、その影響が表れている。地下入口は護岸から約200 m離れており、 $t=900$ sに水位の上昇が始まる。この部分の標高は約T.P.+1.4 mで、+3.3 mまで約2.0 m水位が上昇している。

(5) 浸水流速

図-12に浸水流速の時間変化を示す。抽出点は、幹線道路とビル間の狭い道路、地下駐車場入口斜路の上側と下側である。幹線道路では流れの主な経路上に位置しているため2.0 m/sと速くなっているが、ビル間の狭い道路では流速はあまり上昇しない。斜路部分では、 $t=1000$ sに図-11の地下入口付近の水位が上昇するとともに流速が増加している。斜路下側では、 $t=1400$ sにおいて最大4.2 m/s、斜路上側では3.7 m/sの流速が計算された。 $t=1600$ s以降は、地下は満水になったため、地下への流入流速は急減している。

(6) 浸水流の流体圧

図-13に、圧力分布の時間変化を示す。抽出点は、護岸近くのビル壁面と地下駐車場内の壁面である。護岸背後のビル壁面では、浸水と共に流体圧も上昇しており、30 kPaを超える最大値を示している。地下駐車場内の圧力分布は、 $t=1000\sim1500$ sにおいて流入とともに上昇している。その後、駐車場が完全に水没した後は、圧力は急激に上昇し、80 kPa以上になった。

5. おわりに

都市複合空間への津波の浸水状況を3次的に解析するため、MARS法を応用した高精度な浸水リスク解析手法を提案した。都市の地形や構造物条件をモデルで再現するとともに、そのデータを用いた津波による浸水の再現計算を行った。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 従来、データ量が大きすぎて入力が煩雑であった地形や構造物のデータを、航空測量データベース、都市計画図やCADデータを応用することで、解析モデルに簡単に取り込めるようになった。
- (2) 複雑な都市モデルを構築する際に、新しくVOSモデルを応用し、モデルの構築をより正確に行うことができるようにした。この手法により、解析精度の大幅な向上が期待できることを確認した。
- (3) 新しい手法で構築した都市モデルに津波の波形を与えて、浸水・氾濫解析計算を行った。護岸部分を越流して、複雑な地形や構造物の間を流れていく様子や、地下空間への流入を同時に再現できた。
- (4) 解析結果をCGによって人の視点で可視化することもでき、危険度の理解が容易になる。
- (5) 地図データベースと土地利用状況情報を入手できれば、各都市の臨海部において、家のサイズまで認識可能な精度での浸水リスク予測が可能である。

今回のように、土地利用状況を取り入れる方法を開発したことにより、3次元流体解析手法を都市臨海部の浸水リスク解析に活かすことができるようになったといえる。しかしながら、解析結果の評価において、実験データとの整合性の確認が未だ不十分である。また、現状では計算に相当な時間を要しており、これらの改善が実用化における大きな課題といえる。

最後に、本研究は科学技術振興調整費による「都市複合空間水害の総合減災システムの開発に関する研究」の一環として実施したことを付記する。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1977): 上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—, 地震研究所彙報, 52, pp. 441-460.
- 磯部雅彦・余 賜平・梅村幸一郎・高橋重雄 (1999): 数値波動水路の開発に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 36-40.
- 功刀資彰 (1997): 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 日本機械学会論文集 (B編), 63巻609号, pp. 1576-1584.
- 小谷美佐・新村文彦・首藤伸夫 (1998): 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.
- 永瀬恭一・島田昌也 (2000): MARS法を用いた数値波動水槽に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 46-50.