

Porous Body Model による市街地を対象とした津波氾濫解析モデルの開発

東北大学災害科学国際研究所 正会員 ○山下 啓
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 サッパシー アナワット
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 今村 文彦

1. 序 論：東日本大震災では、都市型津波により、市街地における津波被害が拡大した。強固な構造物が立ち並ぶ市街地では、縮流効果によって建物間の流れは加速し、または、背後といった思いもよらぬ方向から津波が襲ってきたのである。こうした市街地における津波リスクを精緻に評価することは、人的・物的被害の大幅な軽減に直結する。そこで、本研究では、市街地における局所性の強い津波挙動を高精度・高効率に評価することを目的に、建物群を多孔質媒体としてモデル化した Porous body model (PBM)^{1),2)}に基づく平面2次元津波氾濫解析モデルの開発に取り組んだ。そして、宮城県女川町（図-1）の津波氾濫計算を対象として、種々の津波氾濫計算手法による結果と比較し、本モデルによって再現される浸水過程の性質を調べた。

2. 津波氾濫に及ぼす建物影響のモデル化に関する従来手法の着想点と課題：市街地における津波氾濫を解析するために、建物群の影響に関して種々のモデル化がなされてきた。例えば、建物群の力学的な影響（流体抵抗）をモデル化したものが粗度モデル³⁾である。他方、建物群の幾何学的な影響を考慮するために空隙率を導入したモデルとして、植生域氾濫流モデル⁴⁾及び洪水氾濫流モデル⁵⁾が挙げられる。しかしながら、計算メッシュ側面における流量の異方性や建物高さの影響に課題が残ると考えられる。従って、本研究では、建物の幾何学的な影響のモデル化を高度化することを目的とした計算手法を提案する。

3. PBM に基づく非線形浅水波方程式 (PBM/2D)：PBM に基づく非線形浅水波方程式の一般形を導出する。PBM における連続式及び運動方程式に、Darcy 流速（見かけの流速）で記述された、水面及び底面における運動学的境界条件式⁶⁾を適用し、静水圧近似の下、鉛直積分すると、次式に示す PBM/2D が得られる（簡単のために、抗力項を省略し、 x 方向成分のみ記載する）。

$$(\eta + h) \frac{\partial R_V}{\partial t} + R_V \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (R_x Q) = 0 \quad (1), \quad Q \frac{\partial R_V}{\partial t} + R_V \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(R_x \frac{Q^2}{D} \right) + g D R_V \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 h 、 Q 、 η 及び $D (= \eta + h)$ は、それぞれ、静水深、流量、水位及び全水深である。そして、 R_V は、単位水柱当たりの空隙率であり、 R_x は、単位水柱側面における面透過率である。本研究では、浸水高の時間変化が小さく、且つ、建物破壊が生じないと仮定して、式(1) 及び (2) における左辺第1項を無視した基礎方程式を採用する。また、図-2 (a) 及び (b) に示す建物の平面分布情報と併せて、時々刻々の津波の水位と建物高さの両者に基づいて、空隙率及び面透過率を算出するため、建物分布と高さの影響が数値解析に反映される。

4. 東日本大震災の宮城県女川町における津波氾濫計算：図-1 に示す、宮城県女川町を計算対象領域として、①一様粗度モデル、②地形モデル、③植生域氾濫流モデル、④洪水氾濫流モデル及び⑤本モデルによる結果を比較する。ここで、建物形状の幾何学的な影響のモデル化に対する違いを調べるために、③及び④における抗力項を省略した。そして、時間発展型の津波波源モデル²⁾を用いて東日本大震災の津波を再現した。図-3 に、地震発生後 2400 s における①及び⑤による水位分布を示す。①では、東

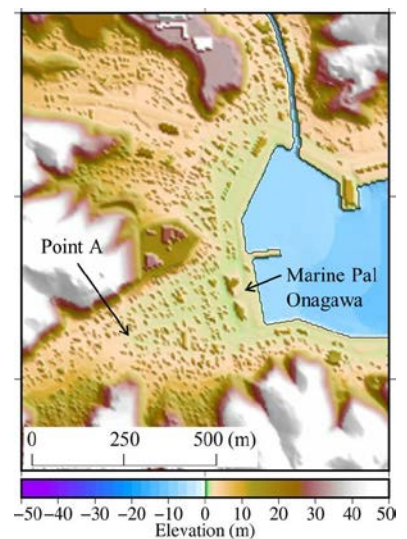


図-1 宮城県女川町の地形（建物高を含む 5 m メッシュ領域）

キーワード 都市型津波・建物群・ポーラスモデル・空隙率・面透過率・宮城県女川町

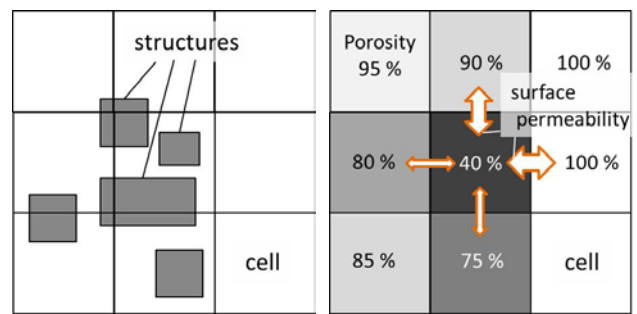
連絡先 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 東北大学災害科学国際研究所 TEL 022-752-2108

西方向の水面勾配は比較的小さく波形が緩やかである。他方、⑤本モデルの水位分布は、大きな水面勾配を有する。建物群の遮蔽効果の影響である。大きな水面勾配による圧力勾配の増大に伴い、流速は大きくなる。そして、建物間を縫う流れが確認され、特に、マリナル女川の西方では、比較的長い直線道路に沿って、高速流れが生じている（図-4）。

図-1 の Point A（マリナル後方における直線道路）における浸水高及び流速の時間変化を図-5 に示す。建物の幾何学的な影響により、津波の到達が遅れ、水位の立ち上がりが緩やかになる（2300 秒付近の②～⑤）。しかしながら、その後、水位が急激に上昇する（2400 秒以降）。そのため、特に④及び⑤では、顕著な高速流れが生じる（2450 秒）。ところで、④における面透過率は、隣接メッシュ同士の空隙率の平均値として表現されるため、道路周辺における面透過率は本モデルよりも過大に評価される傾向にある。従って、④による流速の方が小さな値を示すのである。すなわち、本モデルは、空隙率及び面透過率の両者を詳細に考慮しているため、建物の分布状態に応じて、津波の進行をより制限し、直線道路へ集中する流れ場を再現する。但し、本モデルによって再現される流れ場の精度を調べる必要がある。

5. 結 論：市街地における局所性が強い津波挙動を評価するために、Porous body model に基づく非線形浅水波方程式を導出し、平面 2 次元津波氾濫解析モデルを開発した。そして、本モデルを東日本大震災の宮城県女川町の市街地における津波氾濫計算に適用した。本モデルによって再現される建物間における流速は、従来手法と比較して大きいことが確認された。特に、建物で周囲を囲まれた直線道路では、建物形状の影響を詳細に考慮しなければ、流速を過小評価する危険性があることがわかった。今後は、本モデルの再現精度について検討したい。

参考文献：1) Sha ら, Argonne National Laboratory, NUREG/CR-0785, ANL-77-96, 1978. 2) 榊山・鹿島, 電力中央研究所報告, U91048, 1992. 3) 小谷ら, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.356-360, 1998. 4) 松富ら, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.301-305, 2004. 5) 国土交通省・国土技術政策総合研究所, 浸水想定区域図作成マニュアル (改訂版), 2014. 6) 土屋ら, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.571-575, 1993.



(a) 計算セルと構造物の位置 (b) 空隙率と面透過率

図-2 Porous body model による建物群のモデル化

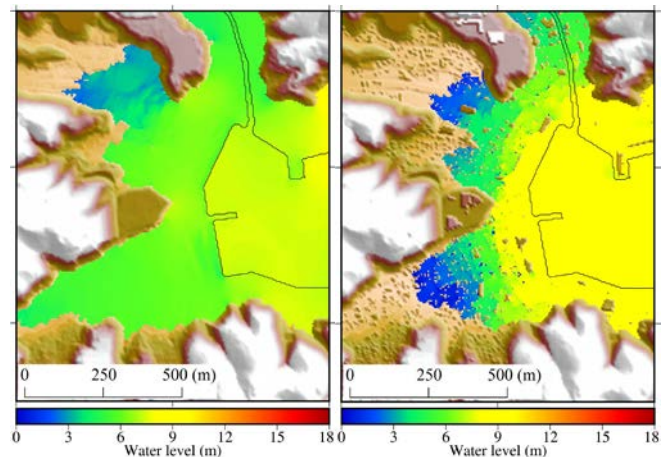


図-3 地震発生後 2400 s の水位分布（左図：①，右図：⑤）

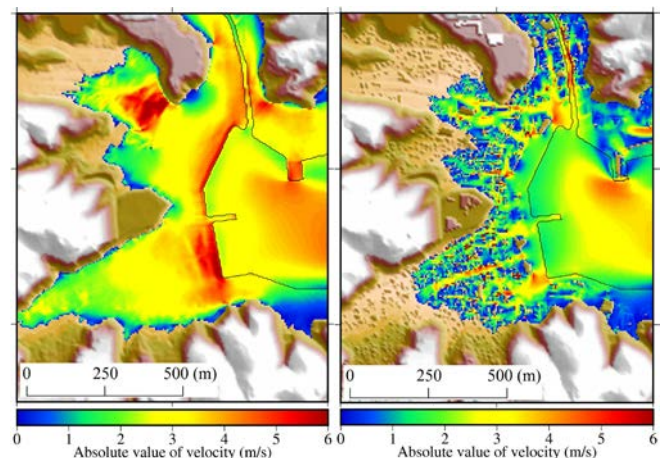


図-4 地震発生後 2400 s の流速分布（左図：①，右図：⑤）

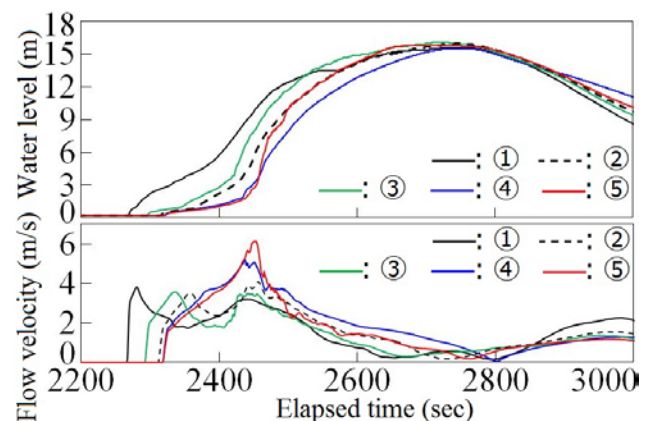


図-5 図-1 の Point A における浸水高及び流速の時間変化