

津波氾濫流の高解像度数値解析に関する基礎的研究

熊本大学 学生会員 ○多田裕治 正会員 山田文彦、中條壯大、外村隆臣

1. はじめに

東日本大震災では、津波氾濫流により多くの構造物が破壊された。これを受けて、中央防災会議では津波対策工（道路盛土、二線堤）や避難ビル、津波ハザードマップの整備を基本案として津波災害対策を進めている。これらの対策を進めていく上で、津波氾濫流の水深や流速、構造物が流れから受ける力を数値計算によって精度良く算定することが求められる。

しかし、図-1 に示す津波氾濫流の先端部のようなボア状の波面の数値解析では、切り立った形状の衝撃波面が次第に鈍ることで正確な水深や流速が得られない。これに対し、衝撃波面を特性理論に基づいたリーマン問題として計算することで高解像度な衝撃波面を得られる数値解析スキームの開発が航空分野などで行われてきた。さらに現在では津波の移動境界を考慮した DART (Dynamically Adaptive High-Resolution Tsunami Model) モデルが開発されている (Liang ら, 2012)。

DART モデルは平面 2 次元の浅水方程式を近似リーマン解法による有限体積法で計算する。本研究では、DART モデルを用いて 2 つのダムブレイク実験の再現計算を行い、結果比較によりモデルの精度検証を行った。また、津波氾濫流により構造物が受ける圧力ならびに流体力の評価方法についての検討も行った。

2. 支配方程式

Navier-Stokes 方程式を水深積分することで得られる浅水方程式は、式(1)のように書かれる。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} = \mathbf{s}, \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{q}$ は保存変数ベクトル、 $\mathbf{f}$ と $\mathbf{g}$ は x, y 方向のフラックスベクトル、 $\mathbf{s}$ はソース項ベクトルである。それぞれのベクトル成分は式(2)のように書かれる。

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \eta \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + g(\eta^2 - 2\eta z_b)/2 \\ uvh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + g(\eta^2 - 2\eta z_b)/2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_{bx}}{\rho} - g\eta \frac{\partial z_b}{\partial x} - \nu_{Tx} \left\{ \frac{\partial^2(uh)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(uh)}{\partial y^2} \right\} \\ -\frac{\tau_{by}}{\rho} - g\eta \frac{\partial z_b}{\partial y} - \nu_{Ty} \left\{ \frac{\partial^2(vh)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(vh)}{\partial y^2} \right\} \end{bmatrix}. \quad (2)$$



図-1 進行する津波氾濫流，岩手県宮古市（毎日新聞）

ここで、 η は基準面からの水表面高、 h は水深、 z_b は地盤高、 u, v は x, y 方向の平均流速、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 ν_{Tx}, ν_{Ty} は x, y 方向の渦動粘性係数である。また、底面の摩擦力 τ_{bx}, τ_{by} は式(3)のように書かれる。

$$\tau_{bx} = \rho C_f u \sqrt{u^2 + v^2}, \tau_{by} = \rho C_f v \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (3)$$

ここで、底面の抵抗係数は $C_f = gn^2/h^{1/3}$ であり、 n はマニングの粗度係数である。

3. 2D ダムブレイク実験結果との精度検証

DART モデルの精度検証として EU CADAM project によるダムブレイク実験の再現計算を行った。実験装置は図-2 に示す通りで、水路に高さ 0.4m の隆起が存在し、 $t = 0.5s$ でゲートが開放することでダムブレイクが発生する。実際の実験では幅 30m の水槽を用いているが、壁面の影響がない中央断面の結果を使用して断面 2 次元の結果としている。計算諸元は表-1 に示す。

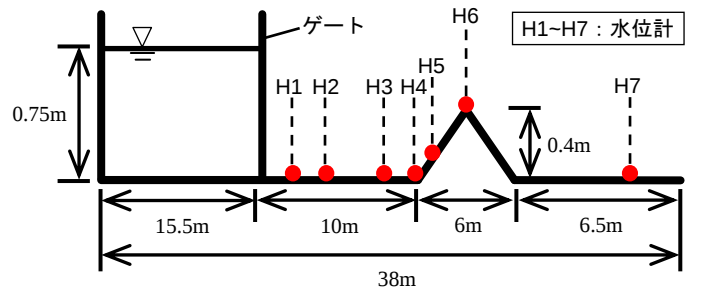


図-2 2D ダムブレイク実験装置図

表-1 計算諸元

計算時間 t [s]	90
計算時間間隔 Δt [s]	0.001
計算格子間隔 Δx [m]	0.05
計算格子分割数	760 × 20
マニングの粗度係数 n	0.0125
渦動粘性係数 ν_{Tx}, ν_{Ty}	0.01

図-3はゲートから10mと13mの位置にあるH4とH6の水深の時系列データである。青丸が実験値、赤線が計算結果である。計算結果は値、位相ともに実験結果と概ね良く一致している。ただし、隆起の前面であるH4において計算値がやや大きくなっている。しかし、DARTモデルでの水深 h の計算精度は概ね良好である。

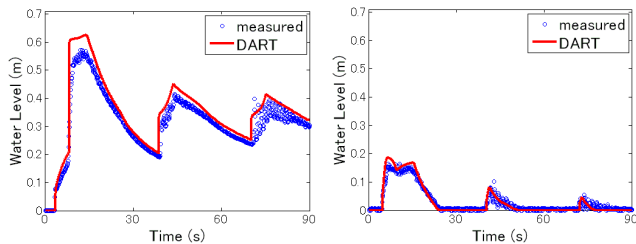


図-3 水深の時系列データ (左:H4, 右:H6)

4. 3D ダムブレイク実験結果との精度検証

次に、水深と圧力の精度検証として、Kleefsman ら (1995)が実施した 3D ダムブレイク実験の結果と比較検証した。図-4には実験装置図、表-2には計算諸元を示す。今回は平面2次元での計算結果であるため圧力の鉛直分布をみることはできない。そこで、実験結果にはBOX 前面のP1~P4の平均値を算出し、計算結果との比較を行った。また、計算モデルによる圧力の算出には式(4)に示す有光の式(有光ら, 2012)を用いた。

$$P = \rho gh + \rho u^2. \quad (4)$$

ここで、右辺第一項は静水圧、第二項は動圧を表す。

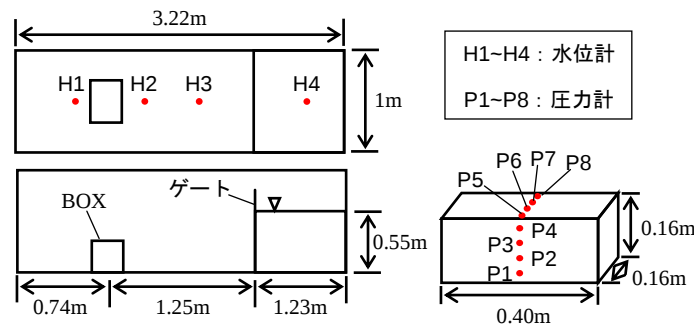


図-4 3D ダムブレイク実験装置図

表-2 計算諸元

計算時間 t [s]	7.4
計算時間間隔 Δt [s]	0.001
計算格子間隔 Δx [m]	0.01
計算格子分割数	322×100
マニングの粗度係数 n	0.03
渦動粘性係数 ν_{Tx}, ν_{Ty}	0.00002

図-5には $t = 0.5, 1s$ の結果を示している。これより、ダムブレイクによって生じた切り立った形状の衝撃波面やBOX にぶつかった後の回り込みも良く表現できていることがわかる。次に、図-6にはH2とH4の水深の時系列データを示す。青丸が実験値、赤線が計算値である。これより、水深の値、位相とも概ね良く一致していることがわかる。ただし、H2の $t = 1s$ 辺りで計算結果が実験値より大きくなっている。これは、実験映像を確認したところ、ダムブレイクを生じた水塊はBOX 前面に衝突した後、BOX 上で水表面がオーバーハングするが、現状の自由表面の運動学的境界条件では表現できない

ためBOX 周辺で水位が高いためと考えられる。

図-7には、BOX 前面における圧力の時系列データを示す。青線がP1~P4の平均値、破線が標準偏差、赤線が計算結果である。BOX に当たる瞬間の衝撃力による圧力の大きさは一致しているが、それ以降の値は実験結果に比べやや大きくなっている。しかし、計算結果は概ね実験値の $\pm 2\sigma$ の間に収まっている。また、圧力の積分値(単位面積当たりの力積)を算出したところ、実験結果では $12.4Ns/m^2$ 、計算結果では $17.9Ns/m^2$ となり、計算結果が実験結果より約40%過大評価であった。次に、図-8には圧力の計算結果の静水圧と動圧の分布を示す。これより、動圧は波がBOX に作用するときが大きくなっており、その他の部分では静水圧が支配的であることがわかる。これより、計算上BOX 前面で水塊が捕捉され実際よりも水位が高くなることで静水圧を過大評価することが原因と考えられる。

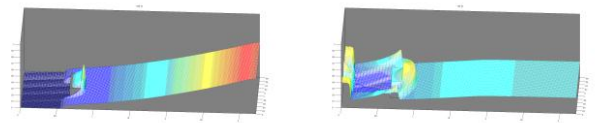


図-5 計算結果図 (左: $t = 0.5s$, 右: $t = 1s$)

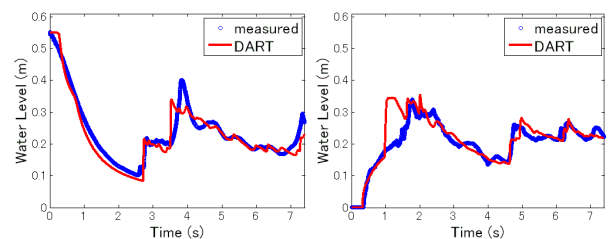


図-6 水深の時系列データ (左:H2, 右:H4)

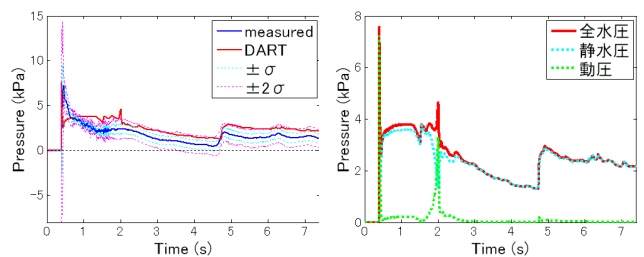


図-7 圧力の時系列データ 図-8 静水圧と動圧分布

5. まとめ

DART モデルを用いて2つのダムブレイク実験の再現計算を行った。その結果、水深 h の計算結果は概ね良好であるが、構造物の前面など流れが阻害される個所においてはやや過大評価となる。これに伴い、圧力(特に静水圧)の値も大きくなっている。この原因として、今回は渦動粘性係数を一定値として与えたため、今後 $k-\epsilon$ モデル等と組み合わせて時空間分布を考慮することが必要である(例えば、増田ら,1995)。

参考文献

- 1) Liang ら, Proc. of the Disaster Management 2012, IIIR, pp.93-102, 2012.
- 2) 有光ら, 土木学会論文集 B2, 68, No.2, pp.776-780, 2012.
- 3) 毎日新聞, 2011年4月11日版.
- 4) 増田ら, 水工学論文集, 39, pp.551-556, 1995.