

一般座標系を適用した利根川での東北地方太平洋沖地震津波の再現計算

(株)建設技術研究所 正会員 ○二階堂 竜司
大阪大学 正会員 青木 伸一
(株)建設技術研究所 正会員 田村 浩敏
(株)建設技術研究所 正会員 神保 正暢
利根川下流河川事務所 非会員 栗山 広宣

1. 研究の目的

本研究は、湾曲した河道形状を詳細に表現できる一般座標系を用いて利根川での東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行うとともに、一般的に用いられている直交座標系の計算結果との比較を行い、河道内の津波遡上計算の精度向上に関する検討を行う。

2. 研究方法

(1)津波シミュレーションモデルの概要

本研究で取り扱うモデルは、直交座標系と一般座標系のどちらも平面二次元非線形長波理論を基礎方程式とし、移流項は一次精度の風上差分を用いている。直交座標系の基礎式は津波の河川遡上解析の手引き(案)¹⁾に記載のものと同様であり、有限差分法により離散化を行っている。一方、一般座標系の基礎式は次式で表され、有限体積法により離散化を行っている。

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{h}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{Uh}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{Vh}{J}\right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q^\xi}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{UQ^\xi}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{VQ^\xi}{J}\right) - \frac{M}{J}\left(U\frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V\frac{\partial \xi_x}{\partial \eta}\right) \\ & - \frac{N}{J}\left(U\frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V\frac{\partial \xi_y}{\partial \eta}\right) + gh\left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J}\frac{\partial Z}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J}\frac{\partial Z}{\partial \eta}\right) + \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Q^\eta}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{UQ^\eta}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{VQ^\eta}{J}\right) - \frac{M}{J}\left(U\frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V\frac{\partial \eta_x}{\partial \eta}\right) \\ & - \frac{N}{J}\left(U\frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V\frac{\partial \eta_y}{\partial \eta}\right) + gh\left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J}\frac{\partial Z}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J}\frac{\partial Z}{\partial \eta}\right) + \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 t : 時間, x, y : 直交座標系の計算軸, ξ, η : 一般座標系の計算軸, Z : 水位, h : 水深, g : 重力加速度, n : マニングの粗度係数, M, N : x, y 方向の流量フラックス, u, v : x, y 方向の流速ベクトル, U, V : ξ, η 方向の流速ベクトル(反変成分), Q^ξ, Q^η : ξ, η 方向の流量フラックス(反変成分), J : 座標変換のヤコビアン, $\xi_x, \eta_x, \xi_y, \eta_y$: 変換のメトリックスである。

また、各変数は次のように定義されるのに加え、下付き添え字の ξ, η, x, y は偏微分を表している。

$$\begin{aligned} \tau_b^\xi &= \xi_x \frac{gn^2}{h^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} + \xi_y \frac{gn^2}{h^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2}, \quad U = \xi_x u + \xi_y v, \\ \tau_b^\eta &= \eta_x \frac{gn^2}{h^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} + \eta_y \frac{gn^2}{h^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2}, \quad V = \eta_x u + \eta_y v, \\ Q^\xi &= \xi_x M + \xi_y N, \quad Q^\eta = \eta_x M + \eta_y N, \quad J = 1/(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi), \\ \xi_x &= J y_\eta, \quad \eta_x = -J y_\xi, \quad \xi_y = -J x_\eta, \quad \eta_y = J x_\xi \end{aligned}$$

(2)計算ケースおよび計算条件

計算ケースを表-1 のとおりであり、一般座標系と直交座標系の手法より、東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行う。

表-1 計算ケース一覧

ケース	計算手法	メッシュ構築
ケース 1	一般座標系	河道形状に沿ってメッシュを構築(流下方向が ξ 軸, 横断方向が η 軸)
ケース 2	直交座標系	東西を x 軸, 南北を y 軸とした直交メッシュを構築

また、計算条件一覧を表-2 に示す。

表-2 計算条件一覧

項目	設定
計算範囲	-1.5k~20.0k(津波による影響が大きい河口堰18.5kより下流を含むように設定)
メッシュサイズ	一般座標系(ケース 1): 縦断方向と横断方向の分割数から平均して約 10m×10m になるように設定(平均のメッシュ面積は 102m ²) 直交座標系(ケース 2): 10m×10m
地形	陸域: 2011 年計測の LP データ(東日本大震災後) 河道: -1.5~5.0k は 2011 年 11 月計測のナローマルチ測量(東日本大震災後), 5.0k より上流は 2009 年度横断測量に東日本大震災の地盤変動量を加えた
構造物	河川堤防, 漁港防波堤(波崎漁港, 銚子漁港), 河口堰, 導流堤の高さを地形として考慮
マニングの粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	低水路: 0.027(-1.5~0.0k), 0.015(0.0~20.0k) 高水路: 0.036(左岸 17.0k), 0.039(右岸 18.5k), 0.045(左岸 18.5k), 0.057(左岸 15.5~16.0k, 右岸 19.5k), 0.060(左岸 13.0~15.0k, 右岸 13.0~18.0k, 19.0k, 20.0k)
下流端(-1.5k)	銚子観測所(気象庁)の観測値をピーク値が Y.P.+3.6m となるように引き伸ばした(図-2)。また、下流端水位は、横断方向に一律で与えた(-1.5k 右岸の銚子漁港防波堤での最大水位が津波遡上時の写真より Y.P.+3.6m 程度となることを確認できたため、観測値を引き伸ばした)
上流端	透過境界
河川流量	考慮しない(河口堰下流は感潮区間であり平常時の河道内水位は潮位が支配的なため)
計算時間 間隔 Δt	一般座標系(ケース 1): 0.05 秒 直交座標系(ケース 2): 0.10 秒

キーワード 河川の津波遡上, 再現計算, 数値計算, 直交座標系, 一般座標系

連絡先 〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎 1-14-6 (株)建設技術研究所 河川部海岸海洋室 TEL 048-835-3528

3. 結果および考察

最大水位の平面分布を図-1、水位計位置での観測値と計算値の比較を図-2に示す。

最大水位の平面分布(図-1)では、-1.5kから0.0kまでは同等の水位となっているが、0.0kより上流側では一般座標系の水位が高くなっている。津波が0.0k付近の河口導流堤(および砂州)を越流しないため、流水幅が狭いうえ湾曲していることが影響していると考えられる。

時系列水位(図-2)では、一般座標系と直交座標系の時系列計算水位は、どの地点においても類似した波形となっているが、一般座標系の方が水位の最大値が大きい傾向にある。銚子水位観測所(0.76k)、荒波(7.0k)、河口堰下流(18.0k)では、一般座標系の計算値が直交座標系と比べてピーク値の再現性が高い。他の地点では、一般座標系の計算値が直交座標系よりも高い水位となる傾向にあるものの、水位計の観測値が10分間隔でありピーク値を捉えていない可能性があるため、再現精度に関して優劣をつけがたい状況であった。また、河口堰(18.5k)にあるCCTVカメラから、河口堰(天端高Y.P.+2.0m)の越流現象を確認できており、一般座標系の計算値は河口堰下流(18.0k)での時系列水位がY.P.+2.0m以上であり、河口堰の越流を再現できている。

以上の水位観測値との比較結果から、最大水位に着目すると、一般座標系は直交座標系の計算値よりも再現精度が高いと考えられる。

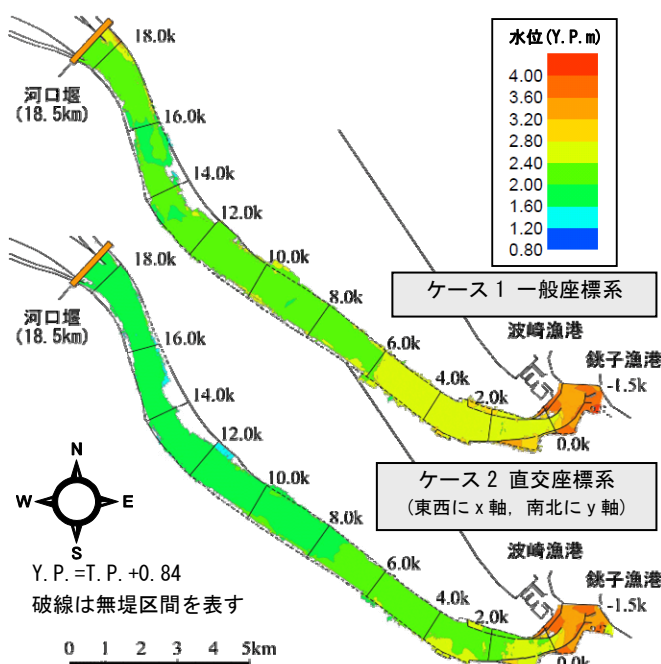


図-1 最大水位の平面分布の比較

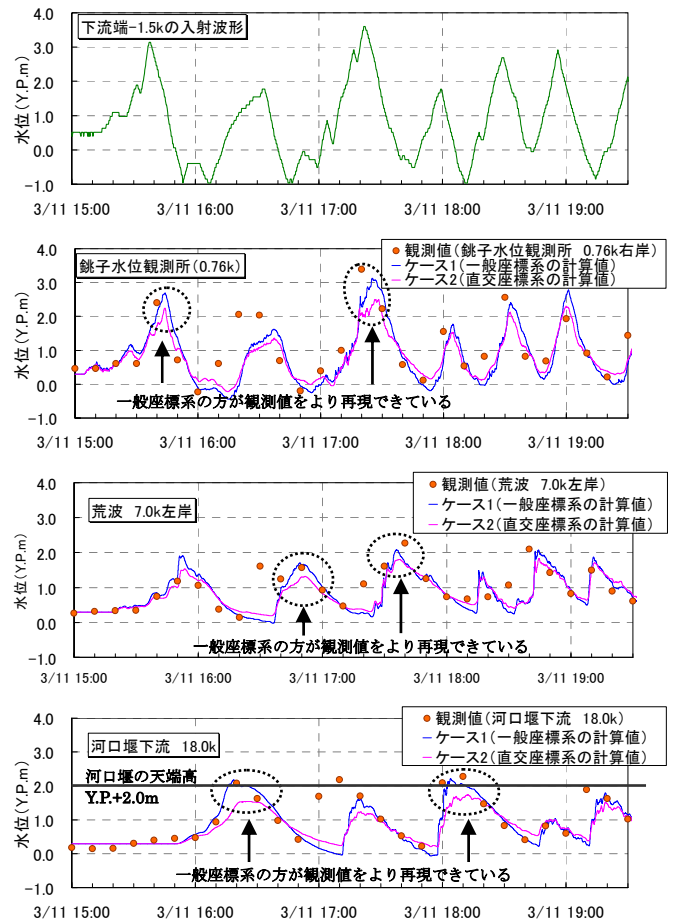


図-2 下流端-1.5kの入射波形および水位計測地点での観測値と計算値の時系列水位

謝辞：本研究は、気象庁が保有する東北地方太平洋沖地震津波の銚子観測所における観測値を使用させていただいた。また、銚子漁港防波堤(-1.5k 地点)における最大津波水位発生時刻付近の写真(表-2 に記載)は有我彰道氏が撮影したものを使用させていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター:津波の河川遡上解析の手引き(案), 2007.
- 2) 後藤智明, 首藤伸夫: 河川津波の遡上計算, 海岸工学論文集, 第28巻, pp.64-68, 1981.
- 3) 坪野考樹, 井上和也, 中川一, 栗原哲: 一般曲線座標を用いた津波の河川遡上による河川高水敷の浸水過程の解析, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 第37回, pp.II.79.1-II.79.2, 1995.
- 4) 赤穂良輔, 石川忠晴: 平成23年東北地方太平洋沖地震津波における利根川下流の津波遡上再現計算, 海岸工学論文集, 第59巻, pp.1543-1548, 2012.
- 5) 長田信寿: 一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析, 水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp.61-76, 1999.
- 6) 独立行政法人水資源機構: 利根川河口堰定期報告書, 2012.
- 7) 独立行政法人水資源機構利根川下流総合管理所利根川河口堰管理所の website : <http://www.water.go.jp/kanto/tonekako/index.html>