

津波の下での底面摩擦に関する研究

東北大学 学生会員 ○西脇 遼
 東北大学 正会員 Nguyen Xuan TINH
 東北大学 フェロー会員 田中 仁

1. はじめに

従来の津波シミュレーションにおいて、底面せん断力はマニング式により算出されていた。これは津波が、長周期波であり、定常流型の速度分布を仮定しているためである。しかし、実際の津波は非定常流であるため、既往研究においてマニング式による底面摩擦の評価は妥当ではないという報告がなされた¹⁾²⁾³⁾。使用する抵抗則によって、津波に伴う土砂移動や地形変化の予測に大きな影響を与える。そのため、底面せん断力を適切に評価する計算手法が必要とされている。そこで本研究では、マニングの粗度係数 n に補正係数 a を乗じた新たな粗度係数 $n_0 (=an)$ を用いた平面二次元計算を行い、マニングの粗度係数 n を用いた従来の手法と比較し、新たな手法の妥当性を示した。

2. 研究方法

今回の数値計算においては二次元浅水方程式を用いた。式(1)が連続式であり、式(2), (3)が運動方程式、(4), (5)が流量フラックス M , N の定義を示す。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{gn_0^2 M}{D^{\frac{7}{3}}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{gn_0^2 N}{D^{\frac{7}{3}}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$M = uh \quad (4)$$

$$N = vh \quad (5)$$

各パラメータは η : 水位, h : 水深, $D (= \eta + h)$: 全水深, g : 重力加, n_0 : 粗度係数, M : x 方向の流量フラックス, u : x 方向の流速, N : y 方向の流量フラックス, v : y 方向の流速である。

新たな計算手法ではマニングの粗度係数に置き換わる粗度係数 n_0 を使用した。これから n_0 の導出を示す。波動摩擦係数 f_w と定常摩擦係数 f_c より新たな粗度係数 n_0 の導出に必要な補正係数 a を求める。 a は場合分けによって式(6), (7)で表わされる。

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} & \text{for } f_w > f_c \\ 1.0 & \text{for } f_w < f_c \end{cases} \quad (6)$$

n_0 は補正係数 a にマニングの粗度係数 $n (=0.025)$ を乗ずることで求まる。

数値計算は前述した浅水方程式を陽形式の Leap-frog scheme で離散化して行う。計算条件を表-1に示す。

表-1 津波シミュレーションの計算条件

項目	内容
断層モデル	1枚の矩形断層における一様滑りを仮定した断層モデル。
メッシュ構成	$\Delta x = \Delta y$ となる正方形格子を用いる。浅海域に向けて格子長を小さくした計算領域を接続。
計算時間	地震発生から5400秒
計算時間間隔	0.5秒
初期条件	初期水位変動量を海底地盤変位量の鉛直成分とする。
境界条件	沖側境界は自由透過 陸側境界は遡上 津波先端部での計算打ち切り水深は0.1cmとする。
底質粒径	$d=0.3\text{mm}$

シミュレーションは東北地方太平洋沖地震に伴う津波を対象とし、東北大学モデル Ver.1.2 を使用した。計算領域は4つ設け、メッシュサイズが大きい順に R1, R2, R3, R4 とした。領域における計算格子の一边の長さは R1=1215m, R2=405m, R3=135m, R4=45m と 1/3 ずつ小さくした。

波動摩擦係数 f_w を使用するうえで底面水粒子軌道振幅 a_m が必要である。 a_m は式(8)で算出される。

$$a_m = \frac{U_{max}}{\sigma} = \frac{U_{max} T}{2\pi} \quad (8)$$

U_{max} は境界層外縁の最大流速である。本計算においても規則波から周期を求めたいが、津波などの実際の波は不規則波であるために規則波を用いることはできない。そこで今回は対象領域の各メッシュの波高 H の時間的变化を求め、 H の最大値から最小値までの時間を半周期とし、メッシュごとの周期を求めた。

キーワード：津波数値シミュレーション, 浅水方程式, 粗度係数, 底面せん断力, シールズ数

連絡先（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL 022-795-745）

3. 計算結果

まず水位に関する結果を示す．ここでは従来の計算手法での最大水位 η_{max1} と新たな計算手法での最大水位 η_{max2} を実測値との平均二乗誤差 (RMSE) を取り、どちらの手法がより正確か調べた．観測地点は 1968 地点である．結果は図-1 に示す．計算領域における水位の傾向に関してはどちらの手法においても追えていた．RMSE を取ると従来の手法では 7.36(m), 新たな手法では 7.29(m)とわずかながら誤差が小さくなった．

次に手法によるパラメータの差異を調べた．調べるに際して深海部から浅水部まで一次元断面を取り、比較を行った．一次元断面として使用した箇所を図-2 に示す．対象領域は R4 である．計算結果を図-3 に示す．図は上段より水深 h , 最大波高 H_{max} , 最大流速 U_{max} , 補正係数 a , 最大底面せん断力 τ_{max} , 最大シールズ数 τ_{max}^* を表す．一次元断面の水平距離は約 40km である．

差異を調べると最大流速と最大波高に関しては深部から浅水部にかけて違いは見られなかった．次に補正係数 a に関して述べる．補正係数 a は深部で 1.25 程度であり、浅水部に向かうに従って 1.0 に漸近している様子が確認できた．次に底面せん断力に関して述べる．比較すると新たな手法が従来の手法よりも大きな値を示す領域が確認され、浅海部に向かうほど値の差は小さくなる．すなわち従来の手法における底面せん断力の過小評価が明らかとなった．最後にシールズ数に関して述べる．シールズ数は波浪による底質の移動しやすさを示すものであり、今回は限界シールズ数 $\tau_c^*(=0.05)$ を用いて底質が移動を開始する場所について考察したところ、新たな手法でのより深い場所からの底質の移動が確認された．

4. おわりに

本研究では新たな粗度係数 n_0 を用いた数値計算を行い、従来の手法との比較を通じて妥当性の検証を行った．従来の手法よりも新たな手法では底面摩擦を考慮すべき領域は広範囲となり、波源域から浅水域にかけて従来の手法における底面せん断力の過小評価が明らかとなった．

謝辞：本研究に対して、大成学術財団から助成を受けた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- Williams, I.A. and Fuhrman, D.R.: Numerical simulation of tsunami-scale wave boundary layers, Coastal Engineering, Vol.110, pp.17-31, 2016.
- 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, 宋 文正: 津波の下での底面境界層発達と底面せん断力の特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第74巻, pp.313-318, 2018.
- Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 西脇 遼, 渡辺一也: 摩擦係数の遷移特性を考慮した津波伝搬の一次元数値計算, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I_697-I_702, 2019.

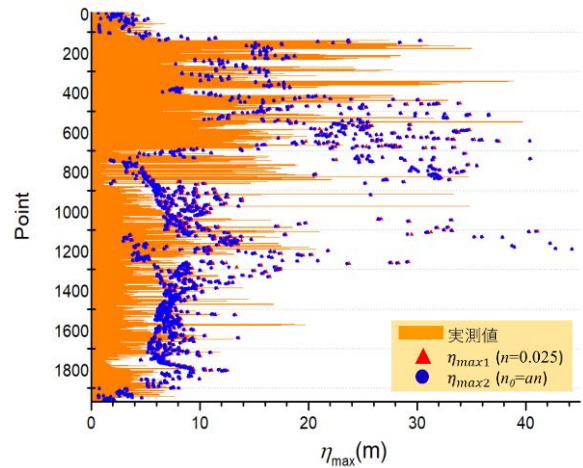


図-1 水位の計算値と実測値

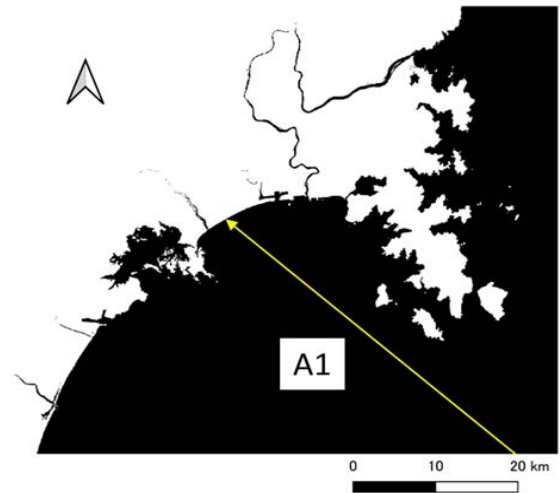
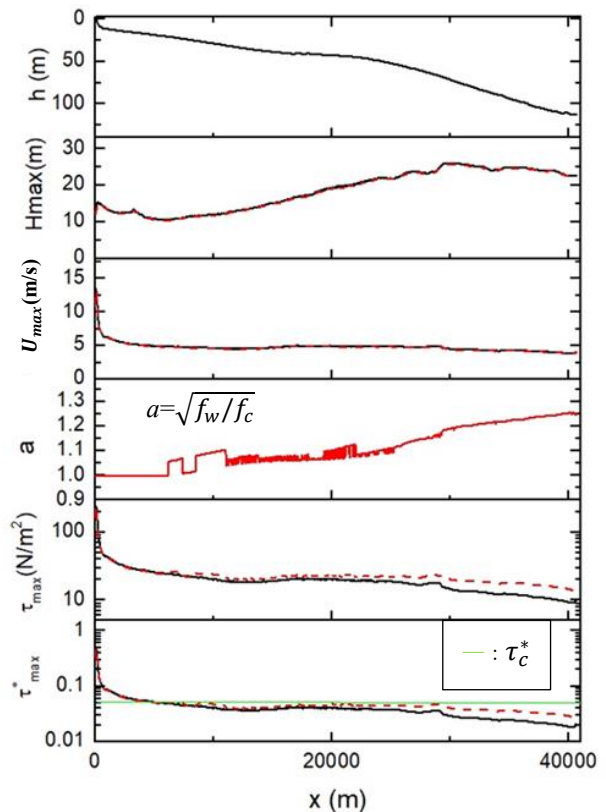


図-2 一次元断面



— : 従来手法, --- : 新たな手法

図-3 数値計算結果の比較