

津波数値シミュレーションに使用する新しい非定常抵抗則の提案

東北大学 ○田中 仁*
秋田大学 渡辺一也**

津波 数値シミュレーション 摩擦係数
乱流 境界層 津波減衰

研究の目的

近年、2004年インド洋大津波や2011年東日本大震災津波などの津波災害が頻発している。この際、甚大な人的・物的被害がもたらされた一方で、大規模な沿岸域での土砂輸送・地形変化が生じた。このような地形の変化は、海浜・港湾などの大規模変容としての重要性のみならず、土砂堆積の記録が過去の歴史津波の規模を推定する上での貴重な手がかりとなるという点でも注目されている。このため、近年、津波に伴う土砂移動および地形変化に関する研究が多くなされており、幾つかの数値シミュレーションモデルも提案されている。この際に、土砂輸送に対する外力である底面摩擦力評価の高精度化が強く求められている。

現在の標準的な津波シミュレーション手法においては、計算時間の制約から三次元的な数値シミュレーションは一般的ではなく、水深平均化された浅水方程式を用いて、平面二次元の数値計算を実施することが一般的である。このため、このモデルを使用する限りは、水深平均化の操作のために、鉛直方向の速度分布およびそれによりもたらされる底面摩擦力の精度に関する議論を行うことは出来ない。

さて、近年まで津波の下での流速分布を測定した事例は皆無であり、定量的な議論が行うことが不可能であった。このような中、2010年チリ地震津波の際に、米国において貴重な現地調査結果が得られた(Lacy et al., 2012)。彼らは2010年チリ地震津波時に米国西海岸において ADCP および PCADP により底面境界層計測を実施した。そこで、申請者らは境界層内の非定常性、底面せん断力変動特性について定量的な検討を行った。この結果によれば、10m という比較的浅い水深においてさえ、現在の標準的な津波シミュレーションで使用されている定常流れの摩擦係数が使用出来ないことが明らかになった。ただし、この研究においては境界層内の速度分布・摩擦力に関する直接的な検討がなされていない限界があった。そこで、本研究においては津波の下での底面境界層の発達、特に底面せん断力特性に関する検討を行い、さらにその成果を平面二次元数値シミュレーションに反映し、これまでの定常流抵抗則による計算手法との相違を明らかにした。

研究の内容

近年、RANS (レイノルズ平均ナビエーストークス方程式)モデルと乱流モデルを組み合わせた津波の伝播計算がいくつかなされている。ただし、いずれも鉛直二次元モデルに限定されている。実務上で求められる平面二次元での津波数値計算においては三次元の乱流モデルが必要となることから、計算時間の点で未だ大きな困難を伴う。また、現在、実務の数値シミュレーションにおいて標準的に使用される計算手法との整合性を考えると、それから大きく逸脱せずに、摩擦係数の波動性を加味できる手法が望ましい。そこで、ここではマンニングの粗度係数を補正する手法を開発した。津波のもとでの底面せん断力を評価するために、通常用いられるマンニングの粗度係数 n に係数 a を乗じて、新たな粗度係数 n_0 を導入することを提唱した。すなわち、

$$n_0 = an \tag{1}$$

ここで、津波波源域を含む深海側で作用するせん断力 τ の最大値は波動摩擦係数 f_w により求められるべきものである。一方、津波が浅海域に伝搬するにつれて、波動摩擦係数 f_w は定常流の摩擦係数 f_c に漸近し、ある箇所まで等しい値となる。すなわち、その場所で式(4)により定義された a の値は 1.0 となり、これより浅くでは従来通りのマンニング式を使用することが出来る。このため、式(1)の係数 a の算定法は次式に示すとおりである。

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} & \text{for } f_w \geq f_c \\ 1.0 & \text{for } f_w < f_c \end{cases} \tag{2}$$

図-1は、この様な新たに提案された摩擦係数を用いて実施した津波の一次元数値シミュレーション結果である。波高 H および流速最大値 U_{max} については、新たな手法と旧来の手法の間で大きな差は見られない。式(1)による係数 a の分布を示した。これより、 $0 \leq x \leq 199.8\text{km}$ では a が 1.0 よりも大きい。すなわち、通常マンニングの n では底面摩擦を過小評価している。一方、 $x > 199.8\text{km}$ のきわめて狭い範囲ではマンニング式が成立している。

図-1(e)には、最大シールズ数 τ_{*m} の分布を示しており、Method 1 (本手法) と Method 2 (旧手法) で差が見られる。そこで、最下段の図-1(f)には、 $r = (\text{Method 1 による})$

τ^*_m)/(Method 2 による τ^*_m)の比を示した。せん断力は補正係数 a の二乗に比例することから、図-1 (d)に示した a の値から、最大シールズ数 τ^*_m については10倍ほどの差違が波源域近くで見られることが確認される。図-1 (f)によれば、本計算手法による移動限界水深付近において、最大シールズ数の比は約1.6である。

図-2には、図-1の計算結果のうち浅海部での結果を拡大している。図-2 (b)において $h=6m$ で $a=1$ となり、これ以浅でマンシングの粗度係数を使用出来るが、これより沖では波動摩擦係数を使用しなければならない。この結果は、全領域で定常流摩擦係数を用いた従来の計算法の問題点を示している。図-2 (c)から明らかな様に、 $\tau^*_m=0.05$ となる移動限界水深は、旧来の手法によれば $h=22m$ に位置しているが、本手法による結果はより深い $h=36m$ において砂の移動が生じることを示している。この様な違いは、式(1)から明らかなように、旧来の手法が粗度係数を過小評価しているためである。このように、津波による土砂移動を扱う際には本手法による底面せん断力の評価が必要である。ただし、防災計画において重要性を持つ水位に関しては差違が無いので、この点に関しては従来の手法の枠組みを変更する必要は無い。

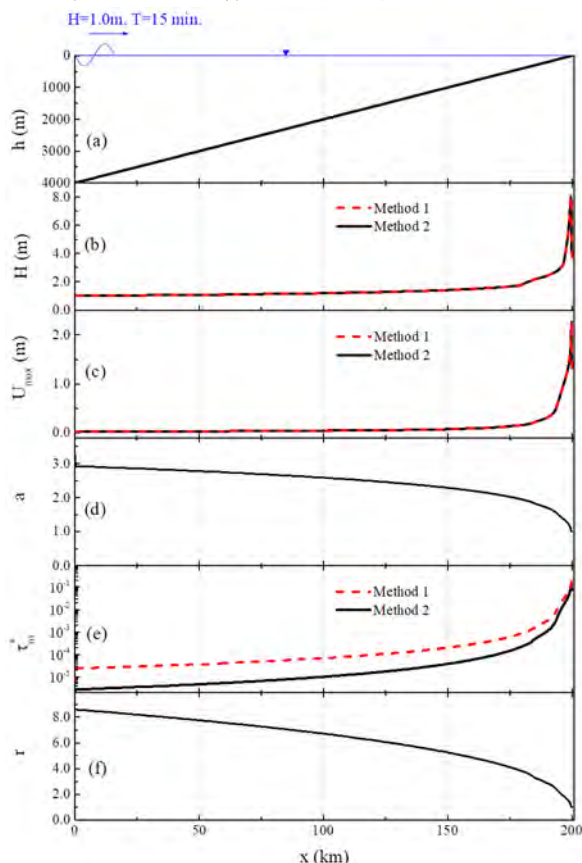


図-1 (a)海底地形、(b)波高、(c)最大流速、(d)修正係数 a 、(e)最大シールズ数、(f)最大シールズ数の比

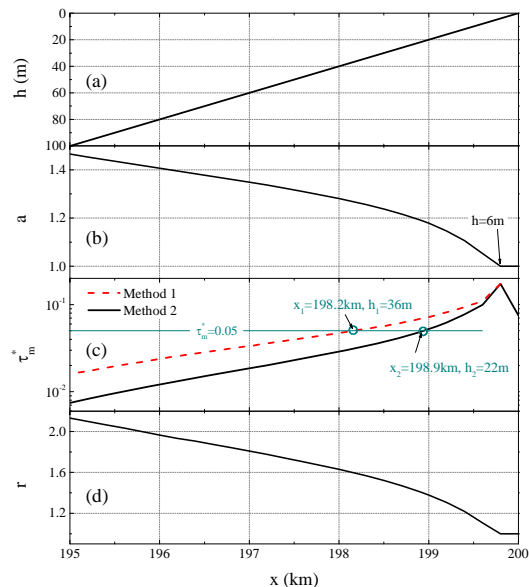


図-2 (a)海底地形、(b)修正係数 a 、(c)最大シールズ数、(d)最大シールズ数の比

次に、平面二次元津波伝播計算においても、波高 H および流速最大値 U_{max} は二つの手法の間で大きな差違は見られなかった。また、実測された津波水位に対する再現性について、従来の手法では $RMSE=7.36m$ 、新たな手法では $RMSE=7.29m$ とほぼ同じ値であった。これにより、平面二次元計算においても水位・流速に関しては新たな手法と従来の手法の間で差違はないことが示された。

研究の成果、新発見

これまで津波の数値計算において一般的に使用されてきたマンシング式による摩擦の評価が、波源から浅海に到る広い範囲で成立しないことが分かった。ただし、運動方程式において通常は局所項と圧力項が釣り合い、摩擦項の大きさが小さいため、一次元計算、二次元計算のいずれにおいても摩擦係数によらず水位・流速の計算結果に差違は見られない。ただし、使用される摩擦係数によってシールズ数の値は大きく異なることがあるので、土砂移動・地形変化のシミュレーションでは本研究の手法を用いる必要がある。

今後の予定

2011年東日本大震災津波による地形変化を対象にして、本研究により開発されたモデルによりシミュレーションを実施する予定である。これにより、流砂量式に含まれる係数をキャリブレーションせずとも、一定の値を用いたままで良好な結果を得るものと期待される。

謝辞

本研究は大成学術財団の支援のもとで行われました。ここに深く謝意を表します。

*東北大学大学院工学研究科・教授

**秋田大学大学院理工学研究科・准教授

*Tohoku University

**Akita University