

実測された津波波形を用いた底面境界層の数値解析

田中 仁*・Nguyen Xuan Tinh*・中村 優一*

1. はじめに

著者らの研究によれば、津波の下での底面せん断力の評価に際し、マニング粗度係数などの定常流摩擦係数ではなく波動摩擦係数を使用すべきケースが存在している(田中ら¹⁾, Tinh and Tanaka^{2),3)})。これらの著者らの研究においては仮想的な津波として、正弦波あるいは孤立波を使用している。これまでの風波下での波動境界層に関する研究によれば、流速波形の違いによる圧力勾配の相違が境界層の乱流構造に大きな影響を与えることが知られている。このため、津波の底面境界層についても、正弦波・孤立波などの単純な波形と実際の津波波形との違いが境界層に及ぼす影響を評価することが重要である。そこで、2011年東日本大震災津波の際に実測された津波波

形をもとに線形長波理論を用いて流速を算出し、その流速波形から乱流モデル解析を実施した。なお、より詳細な内容は別報⁴⁾に報告した。

2. 研究対象データ

以下の数値シミュレーションによる検討においては、2011年東日本大震災津波の際に宮城県北部沖 GPS 津波計により計測された水位データ⁵⁾を対象としている。ここで、一次元的な長波の進行を仮定し、水位波形から次式の線形長波理論より流速の時間変動を求めた。

$$U(t) = \eta(t) \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (1)$$

ここで、 $U(t)$: 断面平均流速, $\eta(t)$: 津波水

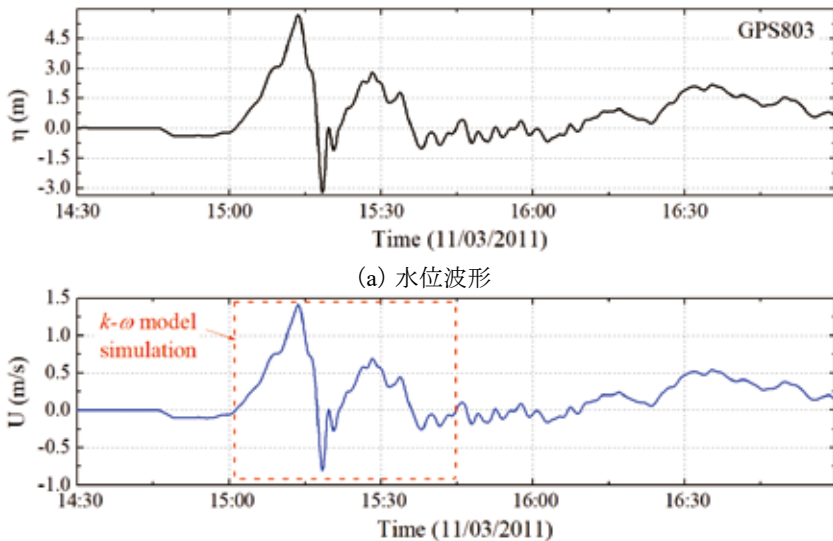


図-1 実測津波波形と式(1)による流速波形

*東北大学大学院工学研究科

位, g : 重力加速度, h : 水深 (=160m) である。図-1 には津波の水位変動および式 (1) により計算された流速変動を示している。本研究においては図に示す時間帯を解析対象とした。

3. 境界層の数値計算方法

以下では, 次式の線形化された境界層方程式をもとに数値シミュレーションを行う。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2)$$

ここで, u : 境界層内水平流速, t : 時間, ρ : 流体密度, p : 圧力, x : 水平座標, τ : セン断力, z : 鉛直座標である。上式において境界層近似を施すことにより, 右辺の圧力勾配項を主

流の加速度に置き換えることが出来る。そこで, 図-1 (b) に示された流速波形から得られる加速度を圧力勾配項に代入する。ここで, 境界層外縁流速は断面平均流速に等しいものと仮定する。

境界層方程式と連立させて方程式系を close するため, これまで数多くの乱流モデルが提案されている。以下では, 定常流を対象に数多くの検証実績があり, また Sana et al.⁶⁾ により非定常運動への応用精度が高いとされる $k-\omega$ モデルを用いる。数値シミュレーションの手法はすでに Sana et al.⁶⁾ に詳細が示されているので, ここでは割愛する。

なお, 海底の底質粒径は $d=0.3\text{mm}$ とし, ニクラゼの相当粗度は粒径をもとに, $ks=2.0d$ から算出した。初期条件は流速ゼロ

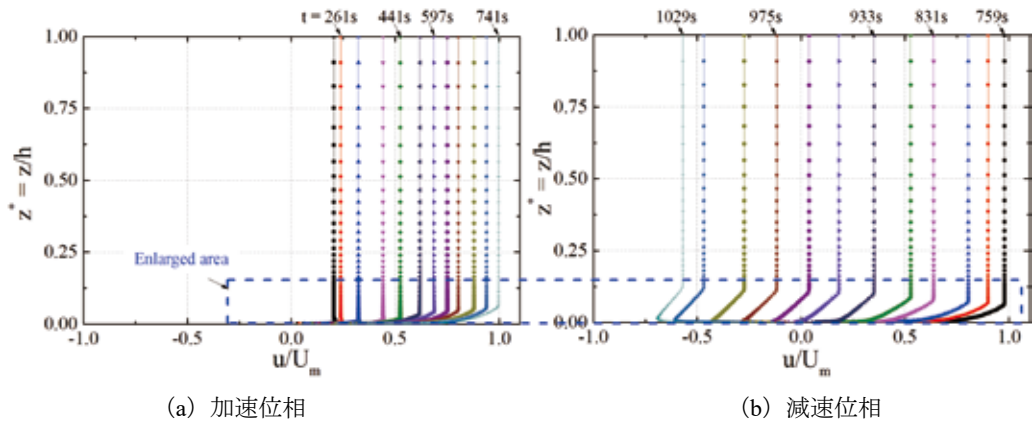


図-2 流速分布

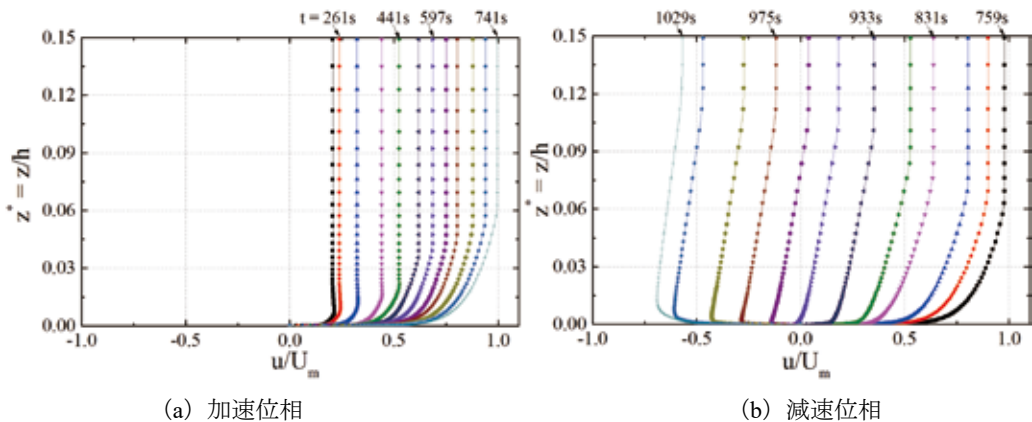


図-3 流速分布(底面近傍拡大図)

とし、静水域に図-1 (b) に示す流速波形を入力した。

4. 結果と考察

以下では、図-1 に示す 2011 年 3 月 11 日 15 時 01 分 35 秒を時間の原点 $t=0$ として図示する。図-2 には乱流モデルにより得られた速度分布を表す。ここで、鉛直座標および流速は水深 h および最大流速 U_m により無次元化している。図-2 によれば、津波の下での底面境界層はきわめて薄く、定常流抵抗則

で想定する対数則の分布が水表面まで発達することはない。図-3 には底面近傍をより拡大して示している。時間の経過に伴う境界層の発達が認められる。これらの図から明らかな様に、津波の下において風波に伴う底面境界層と同様な挙動を示していることが分かる。また、図-2、図-3 において大きな底面付近の速度勾配を有することから、定常流抵抗則による底面摩擦の計算値は過小評価となる。

図-4 は対数軸による速度分布の表示である。特に減速期において底面近傍における位相の進みが顕著であり、ここにも定常流とは

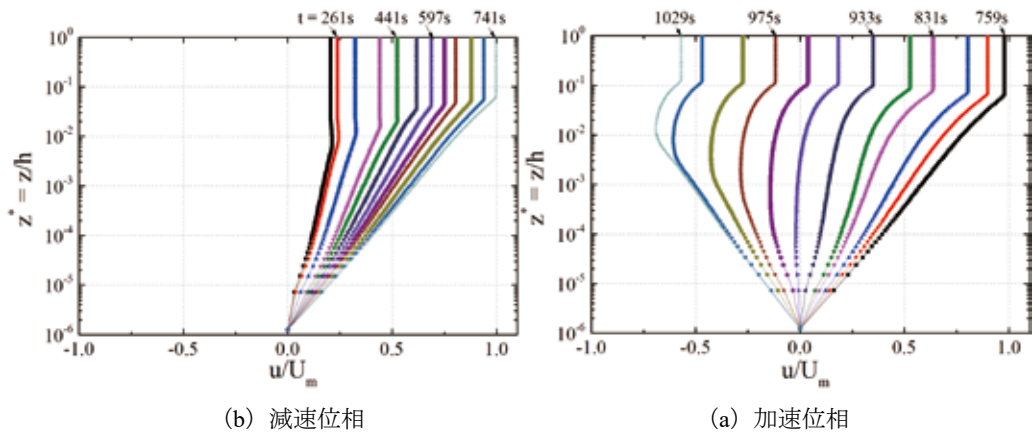


図-4 流速分布(対数軸表示)

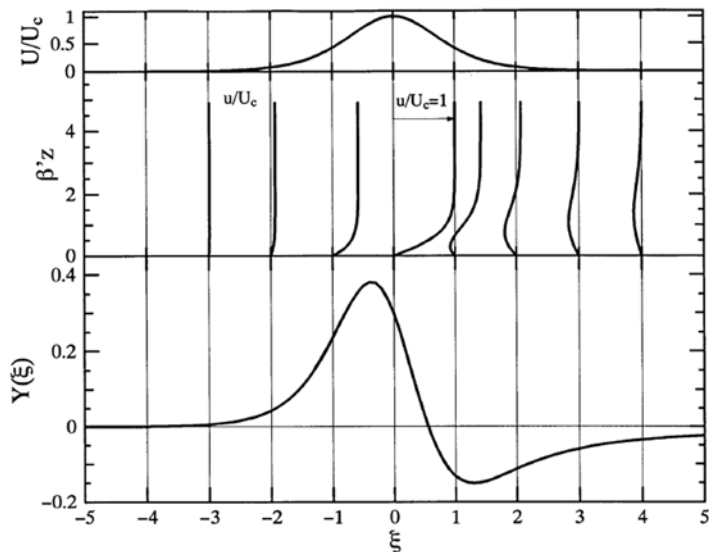


図-5 孤立波下での境界層外縁流速，境界層内流速分布，無次元底面せん断力⁷⁾

大きく異なる特徴が見られる。

以上に示す流速分布は、孤立波下でのそれ^{7), 8), 9)}に酷似している。たとえば、図-5は Tanaka et al.⁷⁾により報告されている孤立波による層流境界層の下での流速分布である。孤立波による層流底面境界層における大きな特徴の一つは、流速波形と底面せん断力の波形が全く異なる点である。このため、通常使用されるような速度の二乗に比例した底面せん断力の算定法が成立しない。k- ω モデルを用いた底面せん断力の特性については別報⁴⁾に報告した。

5. おわりに

2011年東日本大震災津波時に計測された津波波形をもとに、底面境界層の数値シミュレーションを実施した。水平流速の時間変化は孤立波下でのそれに類似しており、周期的に変動する正弦波振動流とは異なる振る舞いを示すことが明らかになった。

謝辞

本研究の実施に当たって、東北大学・清華大学共同研究ファンド(2020年度～2021年度)の学術研究助成を受けた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, 宋 文世: 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), Vol.74, No.2, pp.I_313-I_318, 2018.
- 2) Tinh, N.X. and Tanaka, H.: Study on boundary layer development and bottom shear stress beneath a tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol.61, No.4, pp.574-589, 2019.
- 3) Tinh, N.X., Tanaka, H., Yu, X. and Liu, G.: Numerical implementation of wave friction law into the 1D tsunami shallow water equation model, Coastal Engineering Journal, 2021. (in press)
- 4) Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁: 2011年東日本大震災津波実測波形を用いた底面境界層特性の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, No.2, 2021. (印刷中)
- 5) Kawai, H., Satoh, M., Kawaguchi, K. and Seki, K.: Characteristics of the 2011 Tohoku tsunami waveform acquired around Japan by Nowphas equipment, Coastal Engineering Journal, Vol.55, Issue 3, 1350008, 2013.
- 6) Sana, A., Ghumman, A.R. and Tanaka, H.: Modeling of a rough-wall oscillatory boundary layer using two-equation turbulence models, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.135, No.1, pp.60-65, 2009.
- 7) Tanaka, H., Sumer, B.M. and Lodahl, C.: Theoretical and experimental studies on laminar boundary layer under cnoidal waves, Coastal Engineering Journal, Vol.40, No.1, pp.1-18, 1998.
- 8) Sumer, B.M., Jensen, P.M., Sørensen, L.B., Fredsøe, J., Liu, P.L.-F. and Cartesen, S.: Coherent structures in wave boundary layers. Part 2. Solitary motion, Journal of Fluid Mechanics, Vol.646, pp.207-231, 2010.
- 9) Tanaka, H., Winarta, B., Suntoyo and Yamaji, H.: Validation of a new generation system for bottom boundary layer beneath solitary wave, Coastal Engineering, Vol.59, No.1, pp.46-56, 2012.