

津波による底面せん断力と海岸構造物との関連*

東北大学工学部土木工学科 香澤 佑樹
 東北大学大学院工学研究科 Nguyen Xuan Tinh
 秋田大学大学院理工学研究科 渡辺 一也
 東北大学大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災津波は東北地方沿岸域に大きな被害をもたらした。津波による大きな外力は海浜・河口部の地形を大きく変化させた¹⁾。このうち、Adityawanら²⁾により実施された宮城県野蒜海岸における研究によれば、津波により破壊された捨石堤前面の砂浜は大きく侵食されているのに対して、津波後も残存したコンクリート堤前面の海浜にはほとんど変化が見られていない。このような海岸構造物の相違による地形変化の相違の機構を明らかにするために、従来の浅水流方程式モデルとは異なり、乱流モデルを使用した数値計算手法により、津波の下での底面せん断力に関する検討を行った。

2. 研究対象および数値計算方法

本研究において扱う野蒜海岸の概要を図-1に示す。同海岸は全長約20kmの石巻海岸の西側端部に位置する。この海岸では西側に向かう沿岸漂砂が卓越することから、海岸線の前進が顕著であった³⁾。

本研究においては波源モデルとして東北大学モデル ver1.2⁴⁾を使用し、図-1に示す石巻湾内までの津波の伝播計算を通常の浅水流方程式モデルにより実施した。その計算結果を図-1右図▲点での境界条件とし、ここから岸に向かう直線上でEFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) モデル⁵⁾を使用した鉛直断面二次元計算を行った。鉛直方向に σ 座標30層として、底面近傍に十分なメッシュ数を配置した。乱流モデルとしては、LESに基づきスマゴリンスキーモデルを使用している。なお、以下では (x, y) を平面座標、 z を静水面から上向きに取った鉛直座標、 z' は海底面を原点とする鉛直座標とする。

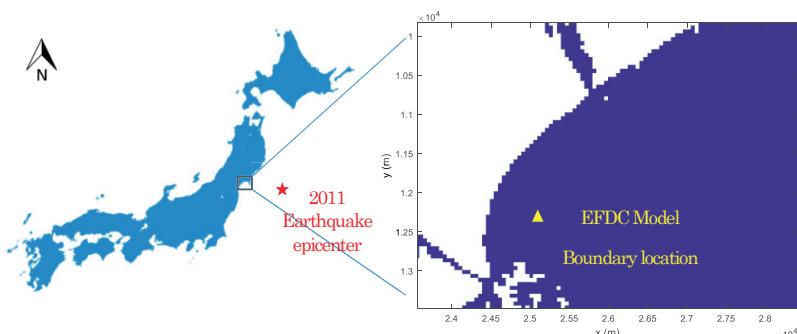


図-1 野蒜海岸の概要と計算領域

* The relationship between tsunami-induced bottom shear stress and coastal structure, Yuki Kutsuzawa, Nguyen Xuan Tinh, Kazuya Watanabe and Hitoshi Tanaka

EFDCによる計算において、底面せん断力の計算には次の二つの方法を使用した。一つは、通常の津波の計算手法と同様に定常流抵抗則を用い、式(1)の摩擦係数 f とそれぞれの時刻での断面平均流速 \bar{u} から底面せん断力 τ_0 を求めるものである（以下、Method 1と呼ぶ）。

$$f = 2 \frac{\kappa^2}{\{\ln(\frac{h}{z_0}) - 1\}^2} \quad (1)$$

$$\tau_0 = \frac{\rho f}{2} \bar{u} |\bar{u}| \quad (2)$$

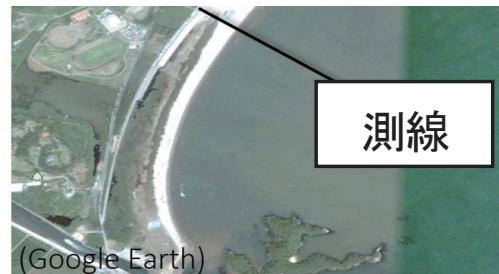
ここで、 κ ：カルマン定数、 h ：水深、 z_0 ：粗度長さ（＝ $k_s/30$ 、 k_s ：相当粗度）、 ρ ：海水密度である。同手法はマニング式の粗度係数による計算手法とほぼ同等である。

一方、流体運動の非定常性が支配的な場合、定常流の下での知見の援用である式(1)では不適切なことがあり得る。そこで、底面境界層の速度分布を考慮し、底面と次のメッシュ（高さ： $z = \Delta_l/2$ ）の流速 u_1 が対数則に従うものとして次式により摩擦速度 u_* を見積もり、これから底面せん断力を得る（以下、Method 2と呼ぶ）。

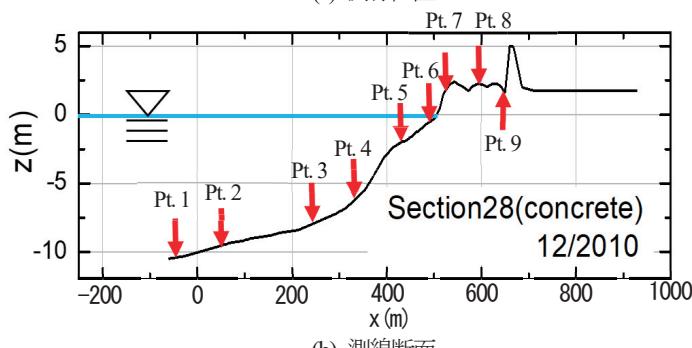
$$u_* = \frac{\kappa u_1}{\ln(\frac{\Delta_l}{2z_0})} \quad (3)$$

$$\tau_0 = \rho u_* |u_*| \quad (4)$$

津波が十分浅い領域まで伝播した時には、境界層が水表面まで発達し、上記二つの手法はほぼ同じ結果を与えるが、水深に比べ境界層厚が薄いときには定常流抵抗則の精度が低下すると考えられる。なお、上式中の相当粗度 k_s は、平均粒径 d_{50} を用いて計算（ $k_s = 2.5d_{50}$ ）した。



(a) 測線位置



(b) 測線断面

図-2 計算結果の出力測線

3. 結果および考察

以下では、コンクリート堤前面に位置する測線 28（図-2(a)）に沿った計算結果を示す。図-2(b)に図示した地点のうち、Pt. 2, Pt. 4, Pt. 6 および Pt. 8 における断面平均流速波形および流速の鉛直分布を図-3から図-6に示している。2011年3月11日15:48から15:58までを図示しており、前半後半でグラフ分けしている。

図-3に示すPt. 2の静水深は9.12mであり、一方、この箇所での境界層厚さ δ は最大で2m程度である。境界層より上方では速度分布が一様である。底面の相当粗度 $k_s=6.25\times 10^4$ mであることから、粗度長さ $z_0=2.08\times 10^5$ mにおいて速度はゼロとなっている。底面近傍の速度分布は対数則に従って変化している。この様に、流速分布は定常開水路流れとは大きく異なっており、むしろ、通常の波動境界層のそれに類似したものである。特に、波動境界層に特徴的な”over-shooting”が見られる。このことから、定常流の抵抗則ではせん断力を過小評価することが分かる。

図-4のPt. 4の速度分布もPt. 2と同様である。第一波による急激な速度の立ち上がりにより、波の峰での境界層は1m程度であるが、その後、減速時に徐々に境界層の発達が見られる。やはり、底面近傍の境界層内においては対数則に従っている。

一方、図-5のPt. 6においては引き波時に水深が極端に浅くなる。このため、境界層は水表面まで発達しており、定常流と同様な速度分布が発現している。

図-6のPt. 8は海岸堤防近くに位置している。津波の立ち上がり部では境界層の発達が見られるが、その後、越流時には死水域が形成されるために、底面近くの流速が低減している。

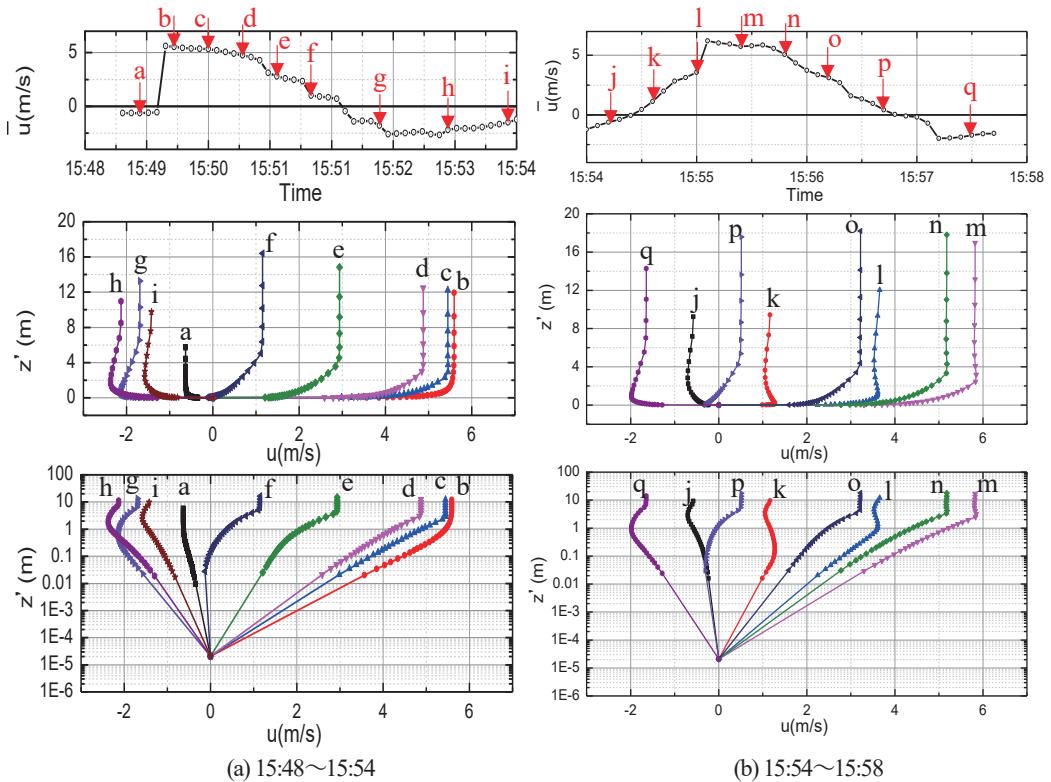


図-3 水位波形と流速分布の経時変化 (Pt. 2)

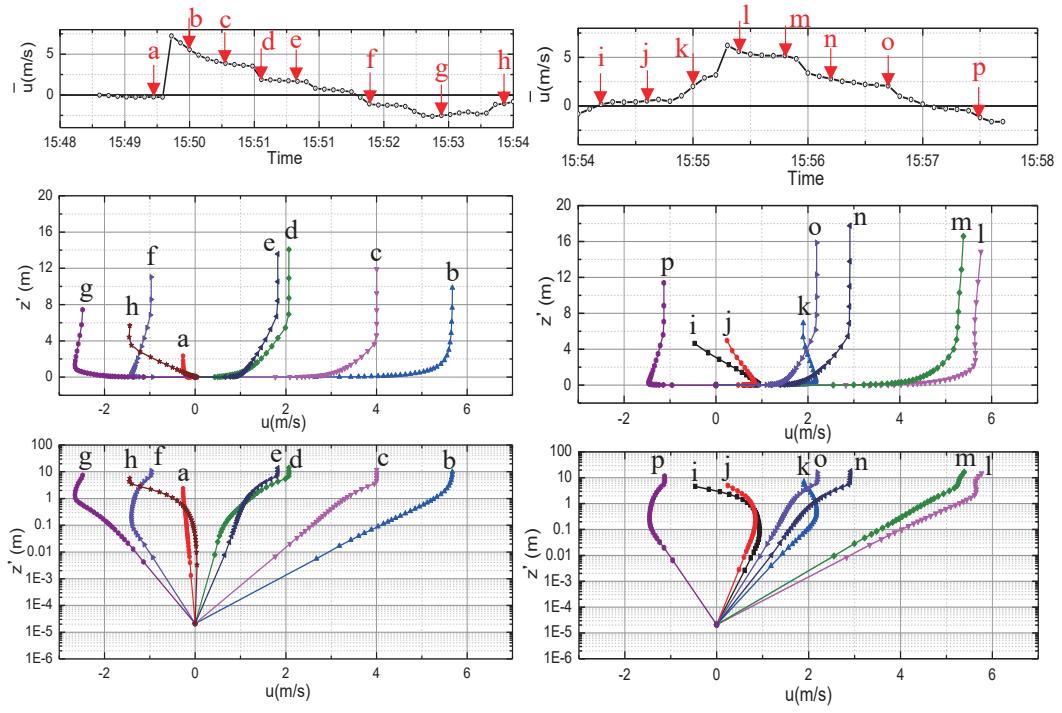


図-4 水位波形と流速分布の経時変化 (Pt. 4)

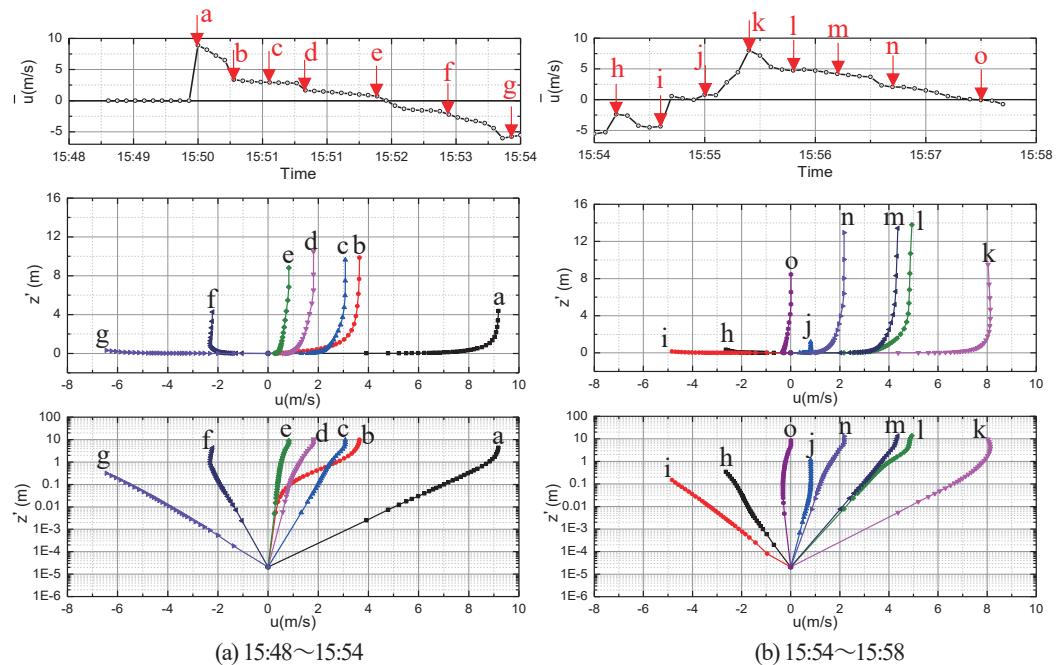


図-5 水位波形と流速分布の経時変化 (Pt. 6)

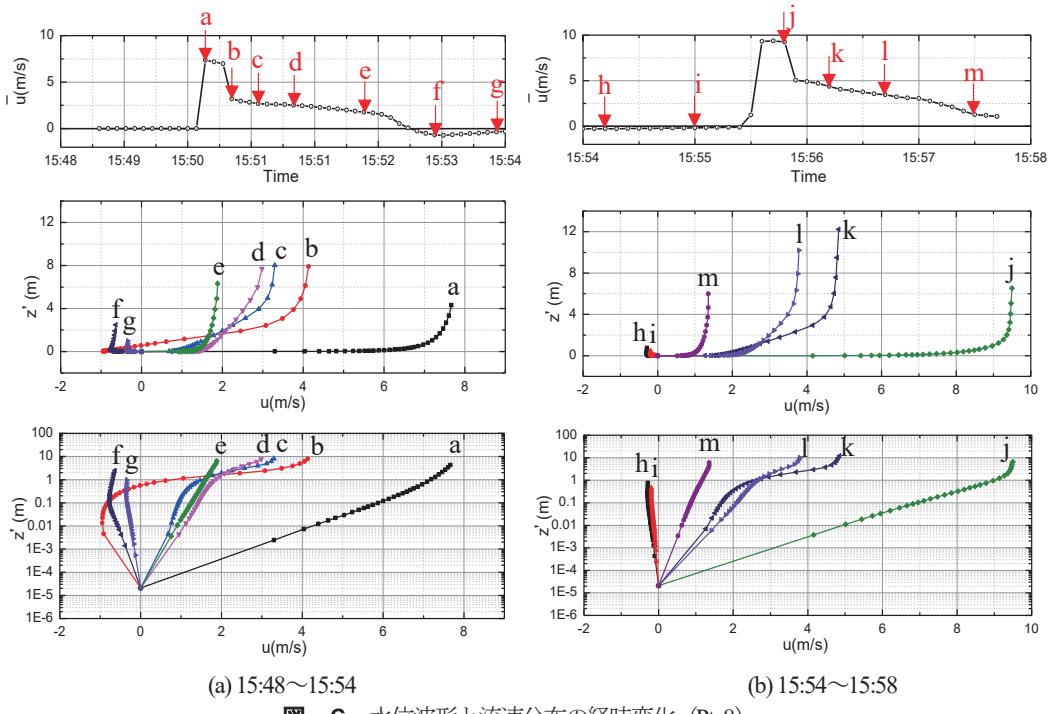


図-6 水位波形と流速分布の経時変化 (Pt. 8)

図-7は二つの方法による底面せん断力の経時変化を示している。図から明らかなように、境界層内の速度分布を加味したMethod 2では、Method 1に比べて大きな底面せん断力を示していることが分かる。特に、押し波時には、Method 2による値が約2～3倍程度の値を示している。一方、岸近くの引き波時には、水深の減少により底面境界層が水表面まで発達し易い。この状況について、すでに図-5、図-6の速度分布において示したところである。このことから、図-7においても引き波時に二つの方法による値が近い値を示している。

図-8は、同じ断面平均流速の下での境界層の発達とせん断力との関係を模式的に示したものである。境界層の発達の程度によって底面近くの速度勾配が異なることから、底面せん断力に相違が表れる。定常流の抵抗則は水表面まで境界層が発達した状況を想定した速度分布に対応するものであることから、底面せん断力を過小評価することとなる。水深に比べて境界層が薄い場合には、運動を支配する代表長さは水深とならないために、式(1)による評価が不適切となる。

4. おわりに

2011年東日本大震災津波を対象として、津波のもとでの底面境界層に関する検討を行った。本研究の結果によれば、定常流の抵抗則を使用する従来の計算法では底面摩擦の評価に誤差を伴うことが示された。土砂移動の計算も含め、今後、さらに検討を進める予定である。

謝辞: 宮城県港湾課より貴重な深浅測量データを提供頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

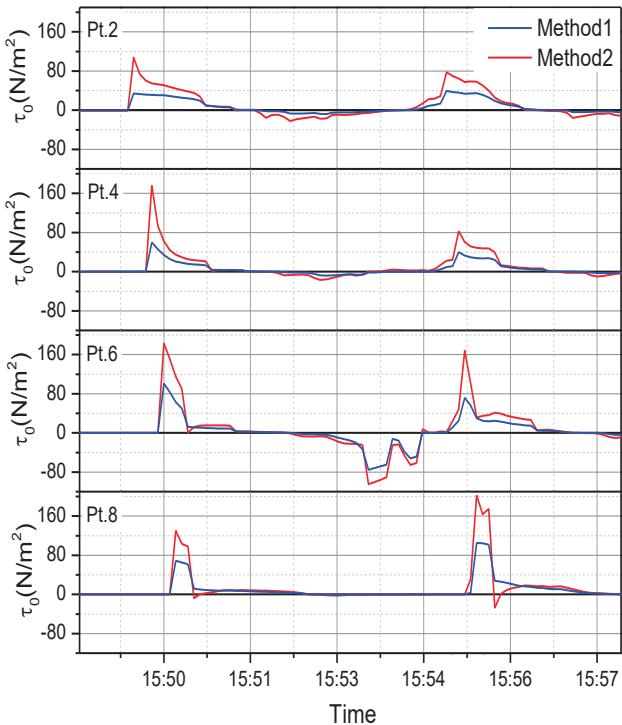


図-7 底面せん断力の変化

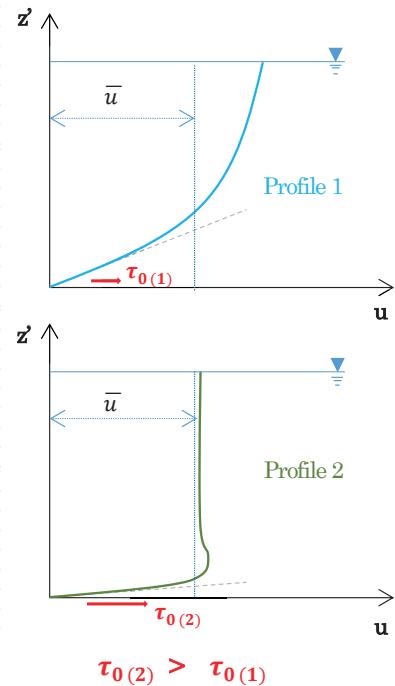


図-8 速度分布と底面せん断力との関係

参考文献

- 1) Tanaka, H., Tinh, N.X., Umeda, M., Hirao, R., Pradjoko, E., Mano, A. and Udo, K.: Coastal and estuarine morphology changes induced by the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 25pages, 2012.
- 2) Adityawan, M.B., Dao, N.X., Tanaka, H., Mano, A. and Udo, K.: Morphological changes along the Ishinomaki Coast induced by the 2011 Great East Japan Tsunami and the relationship with coastal structures, Coastal Engineering Journal, Vol.56, No.3, 21pages, 2014.
- 3) Tanaka, H., Takahashi, G., Matsutomi, H. and Izumi, N.: Application of old maps for studying long term shoreline change, Proceedings of 30th International Conference on Coastal Engineering, pp.4022-4034, 2006.
- 4) 今村文彦, 越村俊一, 馬渕幸雄, 大家隆行, 岡田清宏: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大モデル(version1.2), 東北大大学院工学研究科附属災害制御研究センター, 2012.
- 5) Hamrick, J.M.: A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects, Special Report, Virginia Institute of Marine Science, 317p, 1992.