

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289158

研究課題名(和文)2011年大津波による大規模侵食の機構解明と効果的侵食対策の提案

研究課題名(英文)Erosion mechanism by the 2011 tsunami and the effective countermeasure

研究代表者

真野 明(MANO, Akira)

東北大学・災害科学国際研究所・名誉教授

研究者番号：50111258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：津波や高潮災害では大規模かつ広範囲な浸食が生じ、その後の復興の妨げとなっている。再建に当たっては破壊機構を見極め、壊れにくい構造を再構築する必要があるが、底面侵食と液状化の2大侵食機構が比較されておらず答えが無い。本研究は、両機構をモデルに組み込み定量的に比較することにより最適設計手法を提案するものである。

本研究で実施した両機構の定量的な比較により、液状化深さは、主要な侵食原因ではないが、堤防の根入れを設計する場合に十分な考慮を必要とする破壊原因であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Destructive and wide spanning erosions by tsunamis and storm surge often obstruction for rebuild. The reconstruction requires breaking mechanism to build robust structures. This study accounts two measure mechanisms, bottom shear stress and liquefaction, and find robust structures.

研究分野：流体力学、災害科学、地盤工学

キーワード：間隙水圧 有限体積法 準3次元モデル 浅水モデル 空気圧縮係数 水圧縮係数 津波波力

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年津波前後の仙台湾南部海岸、津波前後の海岸の様子を以下に示す。



津波前



津波後

仙台湾は侵食海岸で、護岸を守るためにT型突堤と養浜工が施されていた。浜は狭く急峻なため護岸の上には高さを稼ぐための波返しが設けられていた。津波の強い波力のため寸断された。

(2) 侵食は仙台南部海岸だけでなく、青森から福島まで広がり、鉄橋、水門、道路橋、橋脚、ビルディングなどすべての沿岸部の構造物に及んだ。これらは何れ再構する必要があるが、破壊のメカニズムを理解したうえで、壊れにくい構造を再構築する必要がある。

## 2. 研究の目的

(1) 流水による侵食は、今回の津波だけでなく、2004年のインド洋大津波や、ハリケー

ンサンディーやカトリーナなどでも痕跡が残されており、広く観測される現象である。これら破壊された構造物を再考するにあたっては破壊過程や破壊機構をよく調べて粘り強い構造とする必要がある。

(2) Harry Yeh(2004)は2004年インド洋大津波の調査を行い侵食の原因として、液状化による地盤軟化の可能性が高いと結論づけている。Tonkinら(2003)は135mの長水路で大規模な液状化の可視化実験を実施し水位低下時に活発な砂の流動をとらえている。Yehは津波の周期と波高から、侵食の主要因は液状化であると結論している。

(3) もう一つの侵食機構は底面せん断力による底質の巻き上げである。水位変動が急激でない場合に主要外力は底面せん断応力となることから、河川工学が培ってきた知識体系が利用できる。

## 3. 研究の方法

本研究は、液状化と底面せん断力による侵食の両機構を数値計算モデルに組み込み、両者の比較を定量的に評価する。これにより、復興に向けて今後必要な対応や最適設計手法を提案するものである。

## 4. 研究成果

(1) 津波による液状化の大域解土中過剰圧力を

$$p_e(z,t) = p(z,t) - p_s(z) \quad (1)$$

とし、圧密方程式は Terzaghi *et al.* 1966 を用いる。

$$\frac{\partial p_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 p_e}{\partial z^2}, \quad C_v = \frac{k}{\rho g M_v} \quad (2), (3)$$

ここで、 $C_v$ ,  $k$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $M_v$  は圧密係数、透水係数、水の密度、重力の加速度、土の圧縮度、 $z$  は

底面から鉛直下方軸である。境界条件として、

$$p_e(0,t) = p_{e0} \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$p_e(\infty,t) = 0, \quad p_{e0} = \rho g \tilde{\eta} \quad (5), (6)$$

を与えると、一般解は以下となる。

$$p_e^* = \exp(-z^*) \cos(t^* - z^*) \quad (7)$$

$$\text{ここで、} p_e^* = \frac{p_e}{p_{e0}}, \quad t^* = \omega t, \quad z^* = \frac{z}{z^+} \quad (8)$$

$$z^+ = \sqrt{2C_v / \omega} \quad (9)$$

である。以下に解析結果の一例を示す。

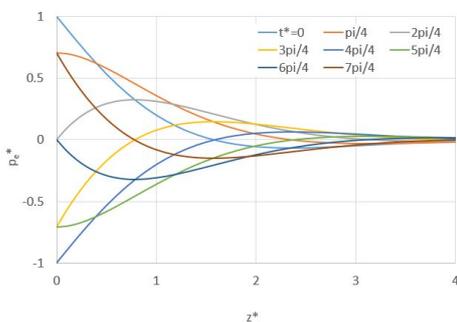


図1．各位相の過剰土圧分布

圧力が土中に伝わる時に、減衰と位相の遅れがあり、最低水面のときに土中加剰圧力が最大になる。過剰土圧と上載過重が釣り合った点が液状化深さである。

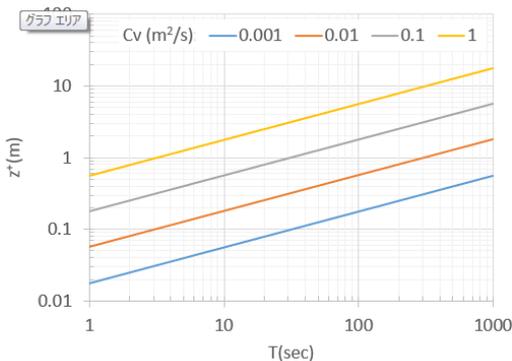


図2．各圧密係数に対する液状化深さ

風波から津波までの代表的な周期と地盤条件に対して示してあるが、周期が長くなるほどまた粗粒分が含まれて圧密係数が大きくなるほど液状化深さは深くなる。

図3は津波高さと液状化深さの関係を示

したものである。 $s'$ は以下の式で示される。

$$s' = \left(\frac{e_s}{e} - 1\right)(1 - \lambda),$$

$\lambda$ : 空隙率、 $e_s$ は土の密度、横軸は津波増幅を代表長さ  $z^+$  で割ったもの、縦軸は液状化深さを津波振幅で割ったもので表示してある。空隙が少ないほど、また土の密度が小さいほど、液状化深さ深くなる。横軸は津波が  $z^+$  を超えると顕著になり、津波振幅近くまで液状化する。

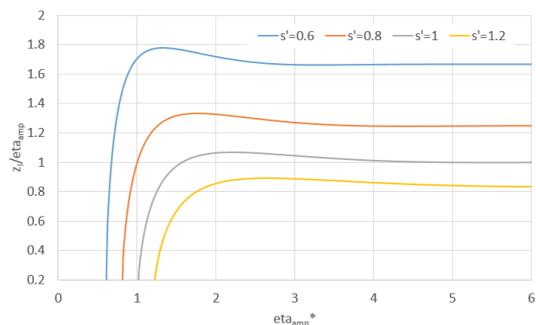


図3．津波高さと液状化深さ

## (2) 準3次元有限体積法モデル

液状化深さと底面せん断力による侵食を比較するために、両方の機構を組み込んだ準3次元有限体積モデルを開発した。流れの計算は浅水方程式、浮遊砂の輸送は van Rijn(1993)による巻き上げ式を用い、地面より下については、鉛直方向に格子を切って各格子の液状化深さを算定した。なお土中の校正式については、空気および土粒子の圧縮も考慮した。また、液状化後の土粒子の挙動は追跡していない。

まずはモデルの検証を目的とし Tonkin らの実験を数値実験で再現することにした。

1 : 2 0 の一様な斜面に孤立派を当て、汀線上に中空の筒を立て、中に VTR をセットして液状化を撮影している。

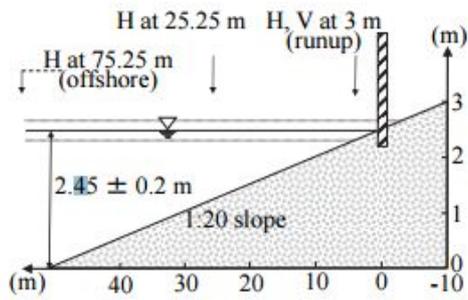


図4 . Tonkin らの実験

円柱前面水位と、側面圧力の時系列を実験と計算で比較した(図5)。実験と計算は一致しており、良好に再現されていることが分かる。

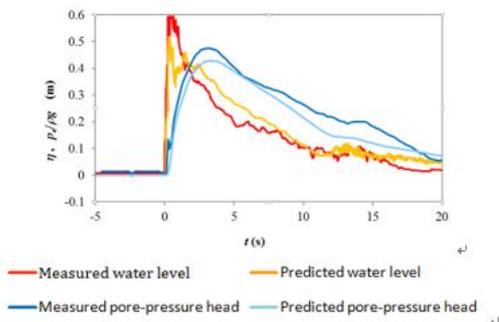


図5 . 水位・圧力変動

### (3) 2011年津波への適用

次にこの手法を仙台市藤塚地区の破堤現場に適用した。ここは直立堤と異形ブロックの乱積み堤の境界部分で、直立堤の背後には3m程度の根入れがかぶせてあったが殆ど洗い流され、端の直立堤ブロックは陸側に転倒していた。



写真1 藤塚地区の破堤現場

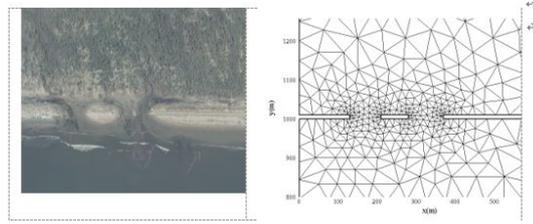


図6 . 仙台市藤塚の破堤箇所

図6の左は、津波の後撮影された衛星写真でこれを有限体積法の境界とした。模擬津波は、一山の孤立派とした。

破堤部から流れ込んだ津波は、開口部および防潮堤背後を侵食し、堤防背後の松林に堆積させた(55min、図7)。100min後(図8)には戻り流れが土砂を海側に運び開口部周辺に堆積させた。図8に示す地点の時系列を図9に展開する。一番上(a)が水位、次(b)が浮遊砂による地盤変化、一番下(c)が液状化深さである。

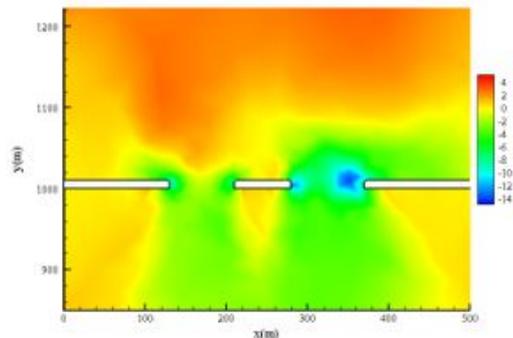


図7 . 侵食・堆積分布 (t=55min)

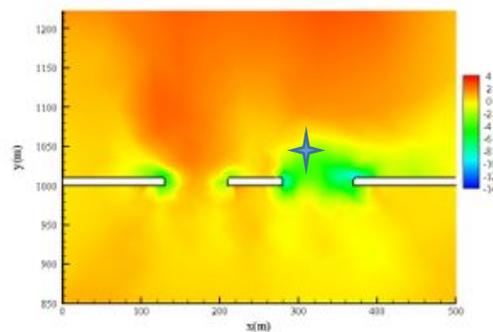


図8 . 侵食・堆積分布 (t=100min)

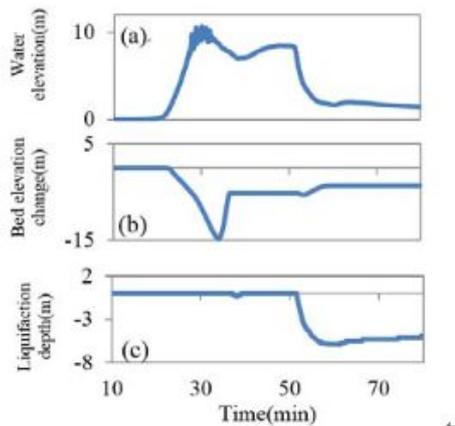


図9 . 水位、底面変位、液状化深さ

第1波の押し波で、強い岸向き流れが発生し開口部が大きく侵食する。陸側部には水がたまり続けるので水位の高い状態が持続し、沖で引きが始まった段階で開口部の水位が急速に低下し5m程度の液状化が発生した。開口部は戻り流れが運ぶ浮遊砂が堆積し埋め戻される。液状化深さは、巻き上げによる最大侵食深の30%程度であり、主要な侵食原因ではないが、根入れを設計する場合に十分に苦慮を必要とする破壊原因である。

「引用文献」

Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G., 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd edit., New York: John Wiley and Sons, 592p.

Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F., and Sato, S. 2003: Tsunami Scour around a cylinder, J. Fluid Mech., 469, 165-192.

Van Rijn, L. C., 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, and Coastal Seas, Aqua Publications.

Yeh, H.: Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations Observations and Technical Guidance from the Great Sumatra Andaman Tsunami, Professional Fellowship Report, 2006.

5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計4件)

平田吉成、真野明、有働恵子、呉修一、2017、植生のある高レイノルズ数流れにおけるモデルの提案、東北地域災害科学研究、No. 53. 89-94. (査読無)

Tatsuki Iida, Shuichi Kure, Keiko Udo, Akira Mano, and Hitoshi Tanaka, 2016, Prediction of the 2011 Tohoku Tsunami Scouring near Structures, Journal of Coastal Research, SI, 75, 821-876. DOI:10.2112/S175-175.1. (査読有)

飯田立樹、呉修一、有働恵子、真野明、田中仁、2016、液状化を考慮した戻り流れによる構造物周辺の洗掘メカニズム、土木学会論文集 B2, Vol.71, No.2, I\_241-I\_246. (査読有)

平田吉成、真野明、有働恵子、呉修一、2014、k-εモデルによる植生のある急勾配流れの乱れ予測、土木学会論文集 B1, Vol.70, No.4, I\_859-I\_864. (査読有)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

真野 明 (MANO Akira)  
 東北大学・災害科学国際研究所・名誉教授  
 研究者番号：50111258

(2)研究分担者

有働恵子 (UDO Keiko)  
 東北大学・災害科学国際研究所・准教授  
 研究者番号：80371780

呉修一 (KURE Shuichi)  
 富山県立大学・工学部・准教授  
 研究者番号：00646995