

東北地方太平洋沖津波を対象とした護岸まわりの地形変化の解析*

パシフィックコンサルタンツ株式会社 永澤 豪
 東北大学大学院工学研究科 田中 仁
 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大久保 陽介

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う津波による土木構造物の被災は、大規模かつ広域に渡り、我国の歴史上、類を見ないものであり、現在、復旧・復興に向けて国を挙げた対応が行われている。この津波は、陸上への遡上に伴って沿岸部で巨大な波力・流速を発生し、多くの沿岸部の構造物を破壊したと考えられる。したがって、その影響を正しく理解し、構造物破壊等のメカニズムを把握することは重要である。著者ら(2012, 2013)は、東北地方太平洋沖地震津波により発生した構造物の被災について、宮城県気仙沼市御伊勢浜海水浴場の護岸について現地踏査および津波の平面計算・断面計算を行って被災要因の推定を行った。その結果、当該海岸では引き波時の強い流れの作用により、護岸が倒壊したことが推測された。

護岸倒壊時に護岸の安定性へ影響を及ぼす要素としては、護岸陸側と護岸海側の水位勾配に加えて、護岸周りの洗掘が挙げられる。被災後の深浅測量の結果から、当該海岸においては大規模な侵食がみられており、護岸倒壊へ大きな影響を与えたと推測される。本研究は、数値波動水路に地形変化計算機能を付与したモデルを用いて、当該海岸の地形変化について検討を行ったものである。

2. 検討対象箇所

研究対象箇所は、宮城県気仙沼市御伊勢浜海水浴場である。被災後の空中写真を写真-1に示す。御伊勢浜海水浴場は、被災前は護岸前に数10m幅の砂浜、背後地にはマツの海岸林を有する弓なりの海岸であったが、東北地方太平洋沖地震津波で護岸が数100mに渡って倒壊・流失し、汀線が50~200m程度後退した。津波浸水高は、15~16m(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値)であり、被災前の護岸背後の地盤高は3~4m前後であったと考えられることから、約10m程度の深さで越流が発生したと考えられる。背後地は、海岸林と田圃と街道沿いの集落であり、浸水範囲内の海岸林・家屋はその多くが流出した。

被災前後の測量結果の比較を図-1に示す。被災前の

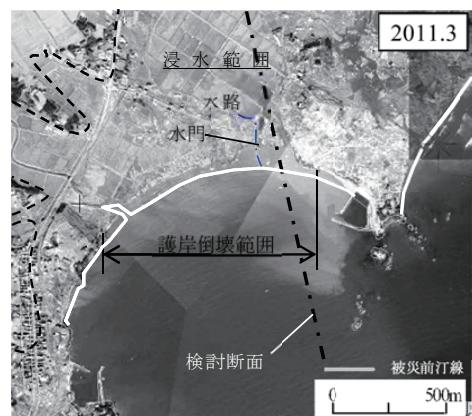


写真-1 御伊勢浜海水浴場被災後写真
(国土地理院撮影)

* Analysis of the geomorphic change around the revetment due to the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake and Tsunami by Tsuyoshi Nagasawa, Hitoshi Tanaka and Yousuke Ookubo

測量データ図-1(a)については、海域は海上保安庁の海底地形図、陸域は被災前の空中レーザー測量データから作成した。被災後の測量データ図-1(b)については、宮城県が実施したもの(2012年10月測量)である。図-1(c)の水深変化量は、図-1(a), (b)の差分値であるが、津波流による地形変化を見るため、地震に伴う地盤沈下量(当該海岸では約80cm)を正味の差分値から差し引いて作成した。

これから、地震に伴う地盤沈下による影響を考慮した場合でも、沖合で約1m、汀線～護岸法線付近で3～4mも地盤高が低下しており、護岸周りの地形(浜堤)と汀線付近の砂浜が完全に流出したことがわかる。

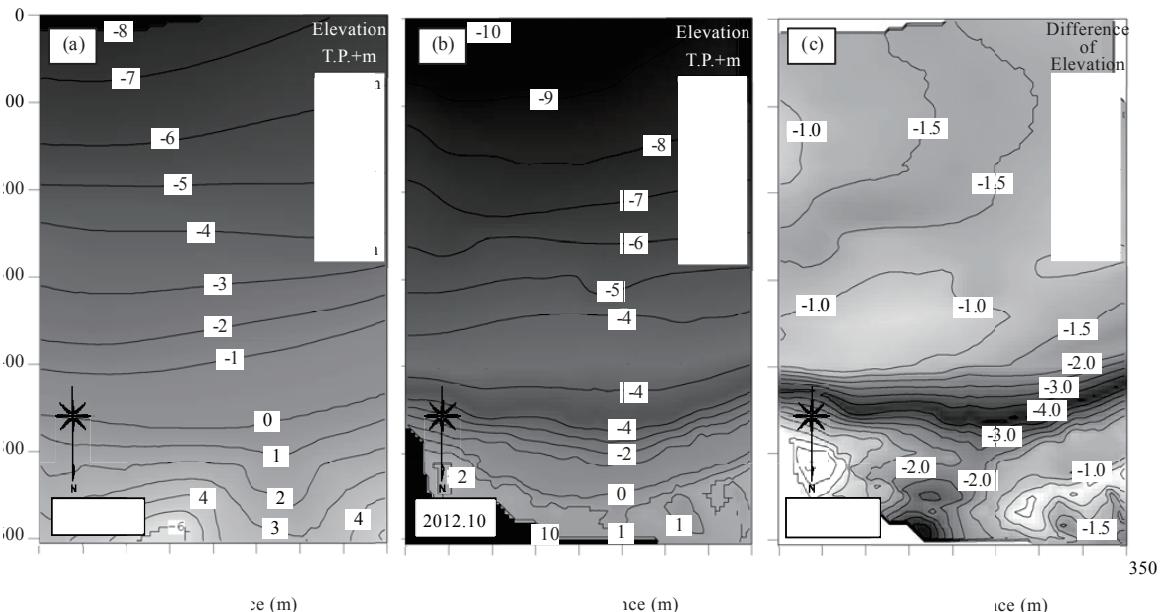


図-1 被災前後の地形変化の状況

3. 検討方法

対象海岸に代表的な断面(写真-1一点鎖線)を設定し、断面地形モデルを作成した。その地形モデルを断面水路として数値波動水路(CADMAS-SURFver. 5.1)を用いて津波解析を行った。入力波は平面津波計算モデルの結果から得られた数値を入力した。

2.1 地形変化の計算方法

地形変化の計算は、数値波動水路による流体の解析と地形変化計算を相互に行うことにより実施した。地形変化計算に用いた計算方法について以下に示す。単位幅の微小区間 δ_x における微小時間 δt での底面高さ Z_B の変化は、流砂の連続式として次式で得られる。

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B}{\partial x} + q_S - C_b w_S \right) \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 Z_B :地盤高、 λ :土砂の空隙率、 q_B :掃流砂量、 q_S :浮遊砂量、 C_b :浮遊砂濃度、 w_S :浮遊砂の沈降速度である。

掃流砂量 q_B は、M.P.M.公式を用いた。

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*C})^{3/2} \sqrt{sgd^3}, \quad \tau_* = \frac{u_*^2}{sgd}, \quad \tau_{*C} = \frac{u_{*C}^2}{sgd} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 τ_* ：無次元せん断力、 u_* ：摩擦速度、 τ_{*C} ：無次元限界せん断力、 u_* ：限界摩擦速度、 s ：砂の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：粒径である。無次元限界せん断力については、岩垣公式を用いた。また、摩擦速度については、次式で算定した。

$$u_* = Cu_{ref} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 u_{ref} は、本検討においては、数値波動水路の底面流速とし、 C は0.06とした。

浮遊砂量 q_S は、津波による土砂移動について検討した高橋ら(1999)に基づき、以下の式を適用した。

$$q_S = 0.012\tau_*^2 \sqrt{sgd} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

浮遊砂濃度 C_b は、流体解析を行う数値波動水路において浮遊砂濃度の移流拡散方程式を解くことで求めた。

また、砂の沈降速度 w_S はRubey(1933)の式から求めた。

$$w_S = \sqrt{\frac{2}{3}sgd + \frac{36\nu^2}{d^2}} - \frac{6\nu}{d} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここに、 ν ：動粘性係数である。

2.2 計算モデル

数値波動水路の計算モデルを図-2に示す。地形条件は、護岸法線より海側(T.P.+3.65m～T.P.-10.0m)については、侵食の影響を見るために遠浅地形を仮定して作成した。T.P.-10m～-30mについては、被災前の海底地形図より作成した。護岸より陸側背後地形については、現地の背後地形の平均的な勾配に合わせて一様勾配とした。地形変化の計算対象範囲(移動床)の範囲は護岸より海側とし、護岸より陸側は固定床とした。

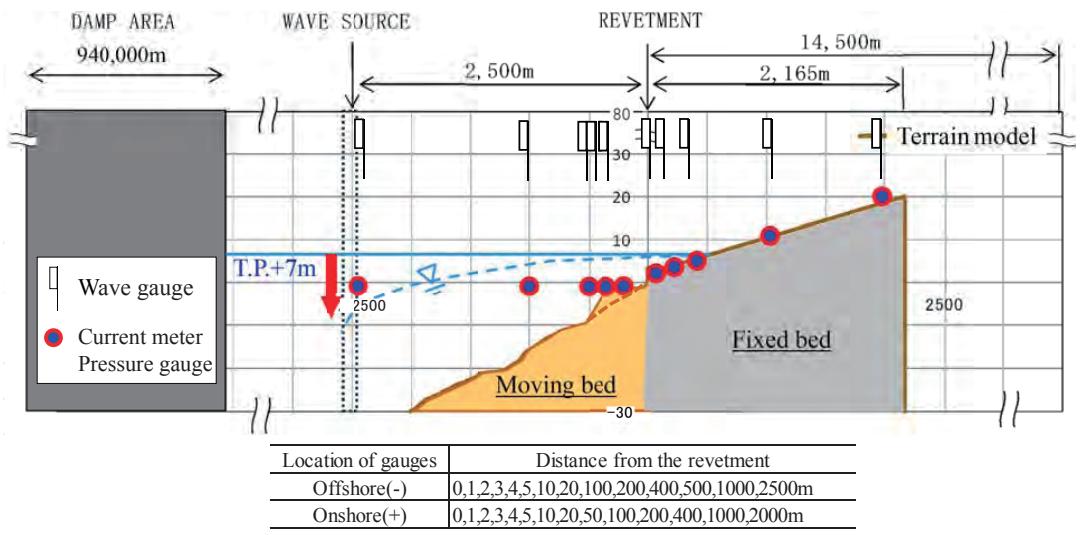


図-2 計算モデル図

2.2 計算条件

数値波浪水路の計算条件を表-1に示す。

2.3 入力波

引き波の計算は、初期状態として、レベル湛水状態 (T.P.+7.0m) を仮定し、そこから沖合水位を下げるにより実施した。沖合水位の変化は、東北地方太平洋沖地震を対象に津波の平面計算を行い、検討断面上で得られた水位を入力した。入力波形を図-3に示す。本研究では波形の1,280秒以降のデータを入力した。

表-1 数値波動水路の計算条件

項目	設定
計算領域	X方向; -952,536m~14,665m Z方向; -30~80m
水深h	29.662m(初期水位T.P.-0.338m)
Δx	0.2m~276m
Δz	0.2m~1m
Δt	1.0D-6~0.1sec
差分スキーム	VP-DONOR
ボーラス下限値	0.1
造波モデル	造波ソース(津波波形入力)
右端側	開境界
境界条件	SLIP
SubLoop	2回
地形変化 関係	砂粒の水中比重 1.65 砂粒の粒径 0.3mm

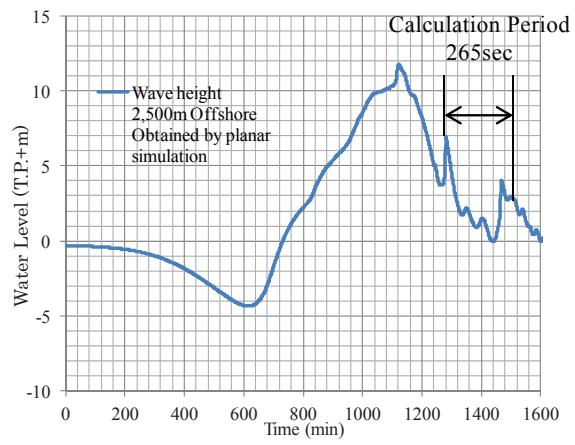


図-3 入力波 (計算値、沖合2,500m地点、引波)

4. 計算結果

護岸周辺の水位変化と流速変化を図-4に、地形変化の計算結果を図-5にそれぞれ示す。

図-4から、引き波で沖合の水位が低下するのに伴い、護岸前面 (Offshore03m, 05m) の水は、約1m程度まで低下する一方で、護岸部の水位が5mで下げ止まり、護岸陸側と海側で4mもの水位差が生じることがわかる。この水頭差により5m/sに達する沖向きの水平流速が生じ、特に護岸近傍部 (Offshore03m) では、鉛直下向きの流れも生じている。

それに対して、図-5の地形変化計算結果では、護岸前面 (Offshore03m, 05m) の流速が大きくなる230sから240sの間で地盤の洗掘が生じ、260sには約1.5mの洗掘が生じる結果となった。一方、護岸基部と-10mより沖合側では顕著な侵食が生じていないが、この部分では洗掘部に見られるような局所的な流速の増大が見られないためと考えられる (図-6)。

5. 地形変化の再現性

本研究で計算した地形変化と現地の地形変化状況を比較すると、現地は護岸が設置されていた箇所で2m~4m程度の侵食と砂浜の消失が生じており、護岸前面の侵食(洗掘)が大きくなるという傾向は現地と一部符合する。しかし、現地では、護岸の倒壊・流出に伴って、さらに大規模な侵食が生じており、引き波時の地形変化の一部を計算した本研究との単純な比較はできない。押波時の地形変化、冲合等の侵食についても評価が必要である。

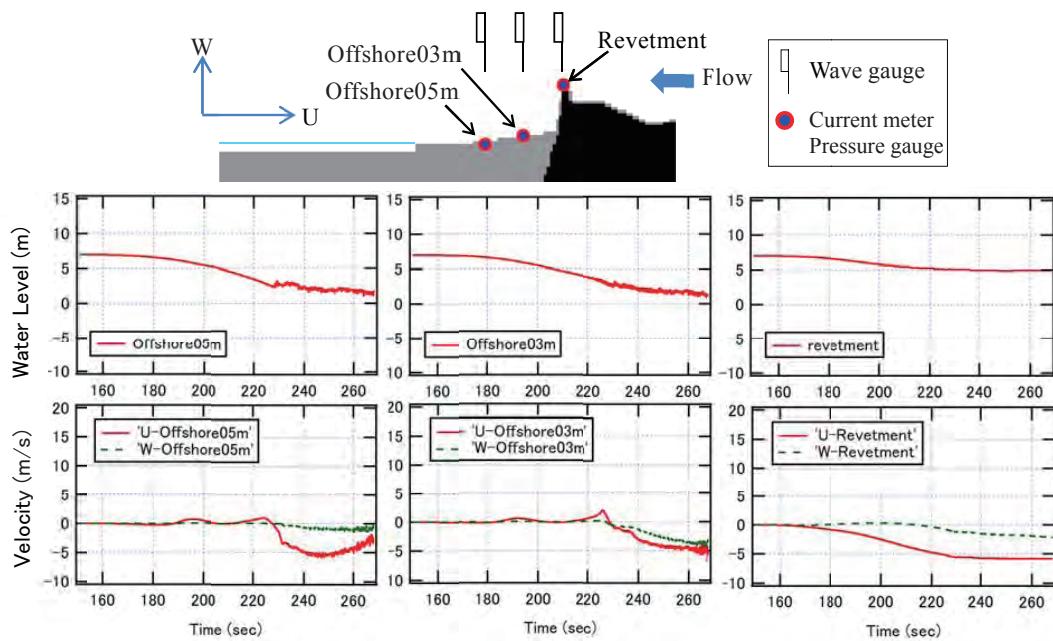


図-4 護岸周辺の水位と流速（引き波）

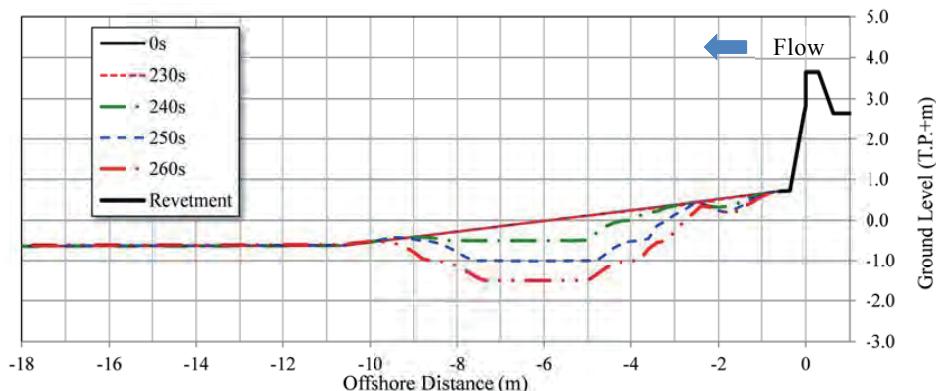


図-5 護岸前面の洗掘状況計算結果（引き波）

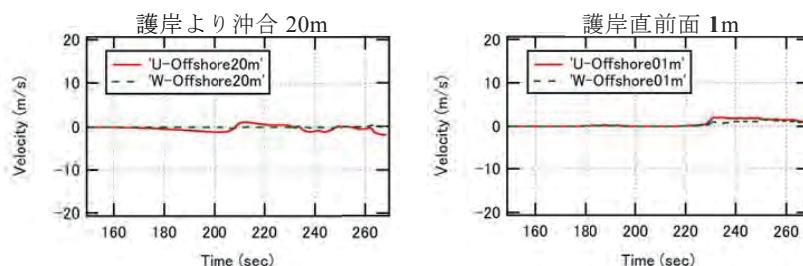


図-6 沖合（Offshore20m）および護岸直前面 Offshore01m の流速変化（引き波）

6. まとめ

東北地方太平洋沖地震津波を対象に数値波動水路による引き波時の津波挙動の再現計算と地形変化モデルでの侵食（洗掘）の検討を行った。その結果、引き波時の護岸前面での高流速の発生に伴う地形変化（洗掘）を計算することができた。検討対象とした現地では、護岸倒壊に伴って、護岸前面の洗掘にとどまらない大規模侵食と砂浜消失が生じていることから、この結果をもって本研究の適用性の評価はできない。しかし、現地護岸の破壊状況により、引き波時の破壊が示唆されていることを踏まえ、護岸の安定性に大きな影響を与えると考えられる護岸周辺の地形変化について、さらに検討を進める必要があると考える。

参考文献

- 1) 永澤 豪・田中 仁(2012)：津波による大規模地形変化とそれに伴う構造物の被災要因の分析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.68,No.2, pp.1361-1365.
- 2) 永澤 豪・田中 仁(2013)：東北地方太平洋沖地震津波を対象とした護岸への作用外力と被災要因の分析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.69,No.2, pp.I_981-I_985.
- 3) 「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による速報値
- 4) 平成 23 年(2011 年)東日本大震災 2.5 万分 1 浸水範囲概況図(宮城県版)国土地理院技術資料 D・1-No.589, No.77
- 5) 土木学会(1999)：水理公式集[平成 11 年版]，丸善
- 6) 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999)：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海岸工学論文集，第 46 卷，pp.606-610.
- 7) Rubey, W. W. (1933) : Setting velocities of gravel, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol.25, pp.325-338.