

津波による地形変化と構造物の被災の解析*

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

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。また、著者らは前報(2014)において、数値波動水路に地形変化計算機能を付与したモデルで当該海岸の引き波時の地形変化について検討した。

本研究は、前報(2014)と同様のモデルを用いて、引き波発生前に発生したと思われる押し波時の護岸陸側の地形変化を検討するとともに、引き波時の沖側の侵食について検討したものである。

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

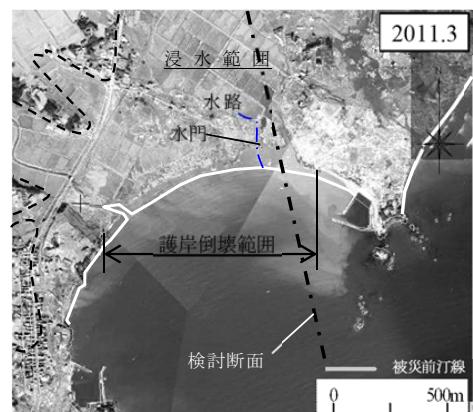


写真-1 御伊勢浜海水浴場被災後写真
(国土地理院撮影)

* Analysis of the geomorphic change and the structural damage due to Tsunami by Tsuyoshi Nagasawa, Hitoshi Tanaka

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(2011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。

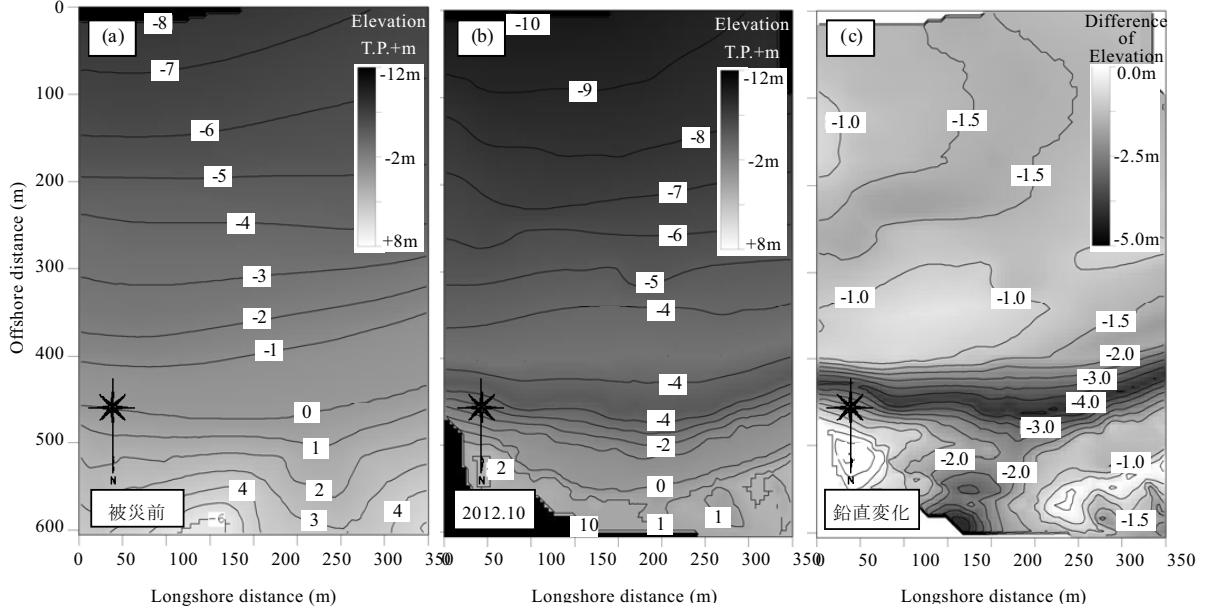


図-1 被災前後の地形変化の状況

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、護岸法線より海側については、海底地形図や護岸等構造物図面より侵食の影響を受けていない断面を作成した。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、押し波時には護岸より陸側とし、護岸より海側は固定床とした。なお、引き波検討時は、固定床・移動床の範囲を押し波検討時の逆とした。

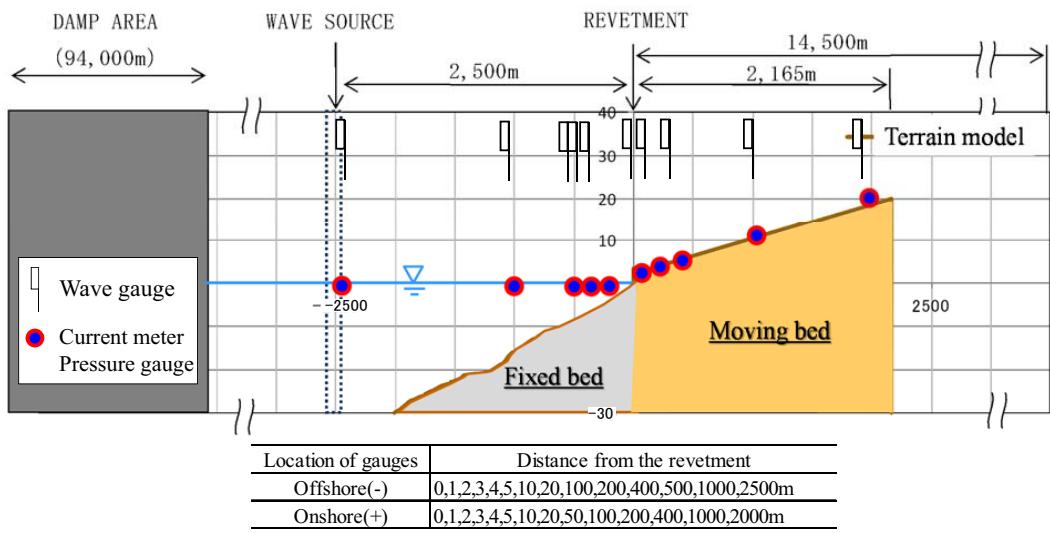


図-2 計算モデル図(押し波検討時)

2.2 計算条件

数値波動水路の計算条件を表-1 に示す.

2.3 入力波

入力波については、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。本稿では、護岸に大きな力が作用すると考えられる押し波時(約 890~900 秒)を含む 940 秒間(図-3 Period-1) の計算結果および引き波時(400 秒間、図-3 Period-2) の計算結果について報告する。

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
ポーラス下限値	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

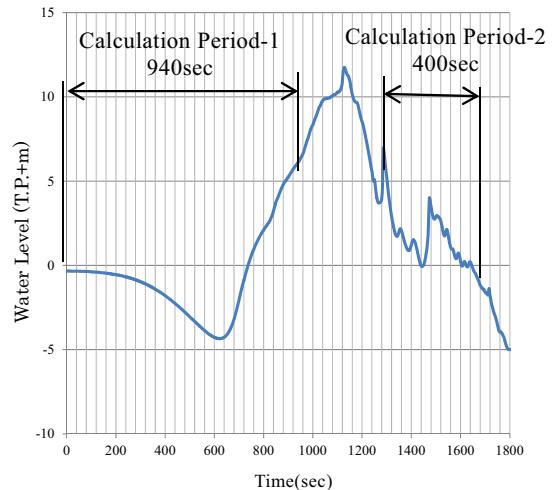


図-3 入力波 (計算値, 沖合 2,500m 地点)

4. 押し波時の護岸背後の流況と地形変化

押し波時の護岸背後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、900 秒を過ぎた時点で護岸背後まで浸水し、護岸から 5m, 10m 地点のそれぞれの水位が上昇している(Onshore05m, 10m)。一方、流況としては、910 秒頃から、陸側護岸に接続する盛土法面背後に斜め下向きの早い流れが生じており(Onshore05m)，これに対応して、護岸背後地盤の侵食が発生している(図-5)。さらに陸側の護岸より 10m 付近では、陸側へ向かう水平の流れが生じており(Onshore10m)，これによっても、侵食が発生し、洗掘範囲が陸側へ広がっていくのがわかる。

本研究で計算した地形変化と現地の地形変化状況(図-1)を比較すると、護岸背後地域にも 1~2m の侵食(地盤高の低下)が見られるものの、津波により護岸および周辺地盤全体が流出しており、護岸背後にできる押し波時の特徴的な侵食については評価が難しい。ただし、一般に、護岸(堤防)高と背後地盤高に落差がある場合には、津波の押し波時には、盛土背後で図-5 に現れているような洗掘が発生する事例が多く、本研究対象箇所においても押し波時にも津波による侵食が発生したと推測される。

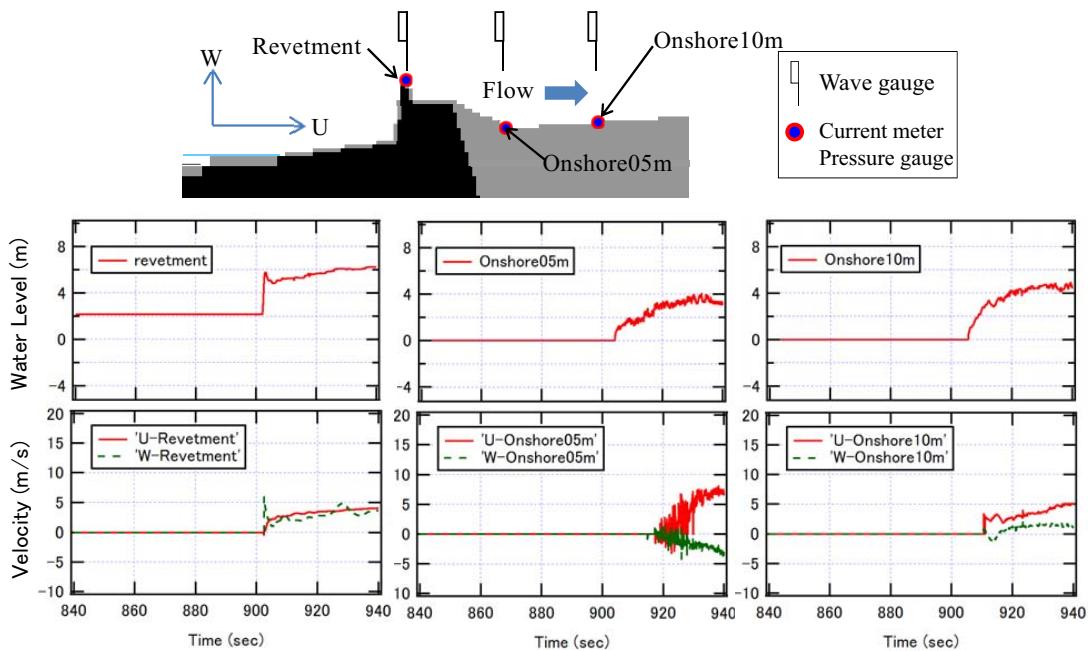


図-4 護岸周辺の水位と流速（押し波）

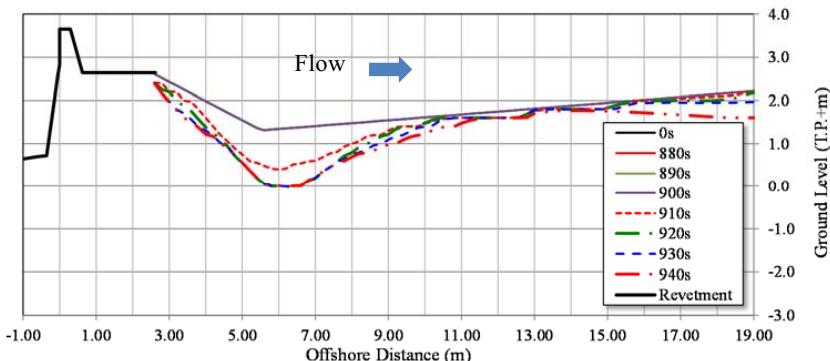


図-5 護岸背後の洗掘状況計算結果（押し波）

5. 引き波時の沖合地形変化

前報（2014）では、引き波時の地形変化について比較的短い期間（図-3、1,280秒から265秒間）の護岸前面の侵食状況について検討した。本報では、計算時間を400秒まで伸ばした場合の試算を行った。その結果を図-6に示す。その結果、護岸海側前面が4m以上侵食され、その範囲が沖合広範囲、非常に深い領域（水深10m以上の領域）まで広がった。この結果は、護岸の倒壊を考慮してなく、深浅測量調査から推測される侵食量と比較しても過大評価といえるが、津波による侵食により海浜が失われた場合、通常波浪による漂砂が生じにくい深い領域まで侵食される点でその影響は非常に大きいといえる。

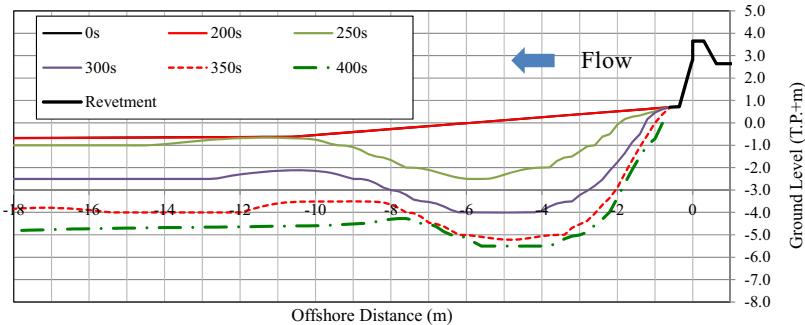


図-6 護岸前面の洗掘状況計算結果（引き波）

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押し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、検討対象海岸では、現地状況および前報までの検討結果から、引き波時の護岸倒壊が推測されているが、押し波時にも護岸背後が侵食された可能性があることが示唆された。

津波による構造物の被災に関しては、押し波・引き波両方の影響を受けることから、破壊のタイミング等、その被災メカニズムの実態について詳細に明らかにすることは極めて難しい。しかし、各々の影響の大きさについて把握し、評価することが、適切な対策の立案につながると考える。

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) 永澤 豪・田中 仁・大久保陽介(2014)：東北地方太平洋沖地震津波を対象とした護岸まわりの地形変化的解析、東北地域災害科学研究(論文集)
- 4) 「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
- 5) 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
- 6) 土木学会(1999)：水理公式集[平成11年版], 丸善
- 7) 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巻, pp.606-610.
- 8) Rubey, W. W. (1933) : Setting velocities of gravel, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol.25, pp.325-338.