

津波による構造物周りの大規模地形変化の解析

永澤 豪¹・田中 仁²

¹パシフィックコンサルタンツ株式会社東北支社（〒980-0001 仙台市青葉区一番町一丁目9番1号）

E-mail: tsuyoshi.nagasawa@ss.pacific.co.jp

²東北大学大学院教授（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

E-mail: hitoshi.tanaka.b7@tohoku.ac.jp

津波の越流に伴う大規模侵食は、護岸の安定性に大きな影響を及ぼすと同時に、環境・利用に優れた貴重な砂浜を消失させる。現在、被災地沿岸の海水浴場では、消失した砂浜が戻らず、再開できた海水浴場は半数にも満たないのが現状である。本研究では、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、押し波・引き波時それぞれ津波越流による構造物周りの大規模地形変化が護岸の安定性へ及ぼした影響について検討した。その結果、研究対象の護岸は、津波の押し波・引き波両方の侵食により不安定になり、最終的には引き波時に倒壊に至ったと考えられる。また、測量データおよび数値計算結果から、侵食された土砂が沖合の深い区域へ流出した可能性が示唆された。

Key Words : geomorphic change, tsunami, beach erosion, revetment, VOF

1. 研究の目的

著者らは、宮城県気仙沼市御伊勢浜海水浴場における護岸の大規模倒壊を対象に、現地踏査および津波の数値解析を実施し、被災要因の推定を行った¹⁾。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。津波の越流に伴う大規模侵食は、護岸の安定性に大きな影響を及ぼすと同時に、環境・利用に優れた貴重な砂浜を消失させる。現在、被災地沿岸の海水浴場では消失した砂浜が戻らず、再開できた海水浴場は半数にも満たないのが現状である。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、押し波・引き波時それぞれ津波越流による構造物周りの大規模地形変化が護岸の安定性へ及ぼした影響について検討することを目的とする。

2. 地形変化状況の分析

(1) 津波来襲前後の地形変化

研究対象の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。しかし、東北地方太平洋沖地震津波で護岸が数100mに渡って倒壊・流出し、汀線が50~150m程度後退した（写真-1）。また、津波来襲前後の深淺測量図から、地震に伴う地盤沈下による影響を考慮した場

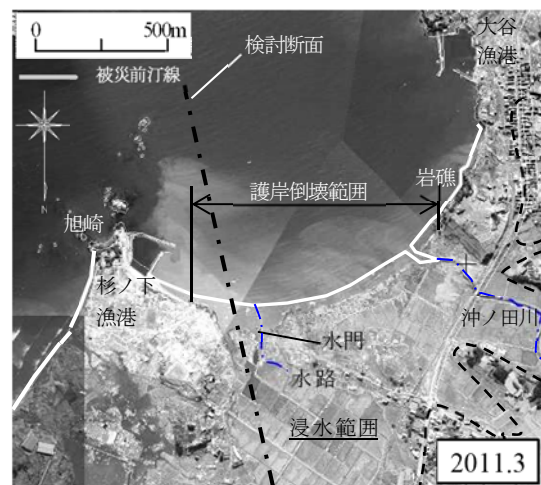


写真-1 御伊勢浜海水浴場被災後写真
(国土地理院撮影)

合でも、沖合で約1~2m、汀線~護岸法線付近で3m以上地盤高が低下していることがわかった。これに伴い、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。

(2) 津波来襲後の地形変化

空中写真から、津波来襲後の汀線の変化状況について解析を行った。その結果、津波来襲3ヶ月後の2011年6月には侵食状況に大きな変化はないが、震災1年9ヶ月後の2012年12月には、ガリ状に侵食されていた中央の区間の

汀線が前進しはじめ、隣接部の汀線が後退していることがわかった。2013年11月も同様の傾向を示しており、津波で侵食され、凹部となった箇所が、通常の波の作用により周辺海岸の土砂で埋め戻され、震災前の滑らかな円弧状の汀線に戻りつつあると考えられる。一方、汀線位置は依然、全体的に震災前の汀線位置から50m以上下がったままであり、砂浜は回復せず、消失した砂は戻っていない。

3. 津波による地形変化の計算

地形変化状況の分析から、分析範囲では津波によりほぼ全域が侵食されており、侵食に対応する堆積は見られていない。また、津波による大規模な侵食が護岸へ及ぼした影響も明らかではない。そこで、津波による大規模地形変化と構造物（護岸）へ及ぼす影響を検討するため、数値計算による地形変化解析を行った。

(1) 解析の方法

対象海岸に検討断面（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）を用いて津波の数値解析を行った。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。

a) 地形変化の計算方法

津波の挙動およびそれに伴う地形変化計算は、数値波動水路による流体の解析と地形変化計算を交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 δx 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式(1)で得られる。

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

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³⁾を用いた。

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \sqrt{sgd^3} \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (3)$$

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd} \quad (4)$$

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_{*c} ：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、式(5)で算定した。

$$u_* = C u_{ref} \quad (5)$$

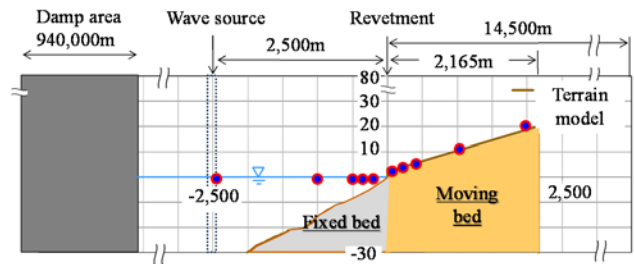


図-1 計算モデル（押し波検討時）

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 は大久保ら⁴⁾の検討を参考にして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⁵⁾に基づき、以下の式(6)を適用した。

$$q_S = 0.012 \tau_*^2 \sqrt{sgd} \quad (6)$$

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Rubey⁶⁾の式(7)から求めた。

$$w_S = \sqrt{\frac{2}{3} sgd + \frac{36v^2}{d^2}} - \frac{6v}{d} \quad (7)$$

ここに、 v ：動粘性係数である。

b) 計算モデル

数値波動水路の計算モデルを図-1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、計算モデルの安定性の観点から、計算範囲を限定し、押し波検討時には護岸より陸側とし、護岸より海側は固定床とした。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。

c) 計算条件

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）に水位を設定し、そこから沖合水位を下げることにより実施した。

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。

(2) 押し波時の地形変化の計算

押し波時の護岸背後の水位変化と流速変化を図-2に、地形変化の計算結果を図-3にそれぞれ示す。

図-1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-3）。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

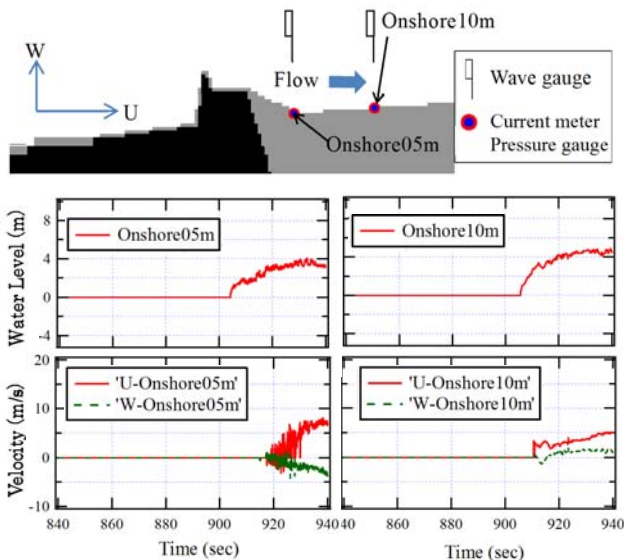


図-2 護岸背後の水位と流速（押し波）

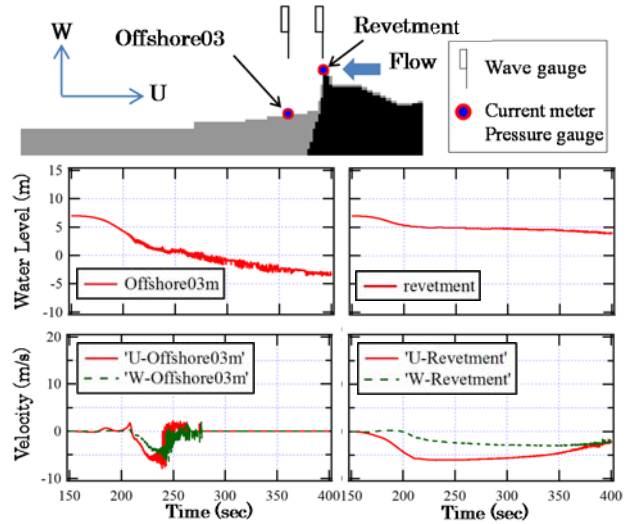


図-4 護岸前面の水位と流速（引き波）

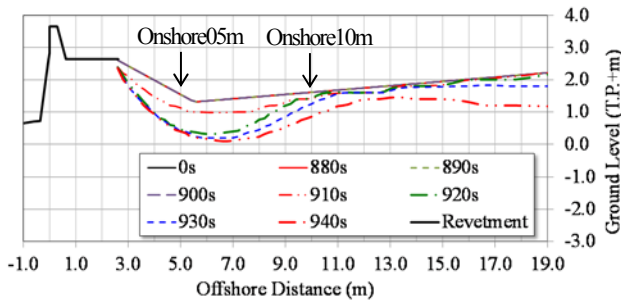


図-3 護岸背後の洗掘状況計算結果（押し波）

生じており（Onshore10m）、この流れに伴う侵食により、洗掘範囲が陸側へ広がっている（図-3、930s以降）。本研究で計算した地形変化と現地の地形変化状況と比較すると、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は、津波の押し波時には、盛土背後で図-3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。

(3) 引き波時の地形変化の計算

引き波時の計算は、初期状態として、レベル湛水状態を仮定し、そこから沖合水位を下げることにより実施した。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）の水は、継続して低下する一方で、護岸部の水位が5mで下げ止まり、護岸陸側と海側で4m以上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）の流速が大きくなる230sから地盤の洗掘が生じたと考えられる。最終的には、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。図-6に沖合の地形変化計算結果を示す。顕著な侵食領域は、水深20m程度まで広がっており、明確な堆積領域は見られないことから、侵食した土砂は系外の非常に深い領域まで移動するという結果となった。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。しかし、深浅測量の結果からも水深10m以上の範囲まで侵食範囲が広がっており、当該海岸の計画波に対する完全移動限界水深は約8m程度であることを考慮すると、通常波浪による漂砂が生じにくい範囲まで侵食されているため、津波による侵食により海浜が失われた場合、その影響は非常に大きいといえる。

(4) 侵食の護岸の安定性への影響

a) 押し波時の侵食による護岸安定性への影響

押し波時の地形変化計算結果（図-3）より、対象海岸の護岸においても背後地の侵食が生じたと考えられる。対象は背後法面被覆のない護岸形式となっており、これにより護岸背後土砂が侵食され、天端被覆工等が被災した可能性がある。しかし、侵食範囲は比較的護岸本体基礎から離れた位置が侵食しており、護岸の完全倒壊までは至らなかったと考えられる。現地調査においても元々の法線位置より陸側へ流出した護岸は見られなかった。

b) 引き波時の侵食による護岸安定性への影響

引き波時の地形変化計算結果（図-5）では、護岸基礎前面の地盤の著しく侵食される結果となった。護岸の安定計算を行った結果、基礎工下端高を T.P.-1.0m とした

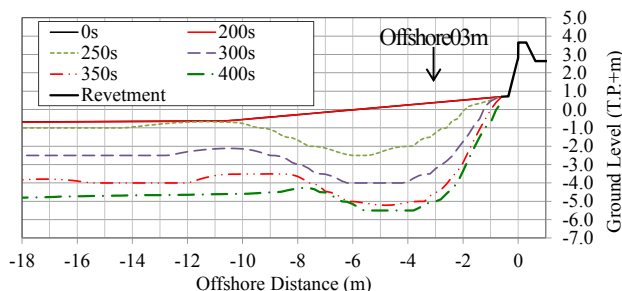


図-5 護岸前面の洗掘状況計算結果 (引き波)

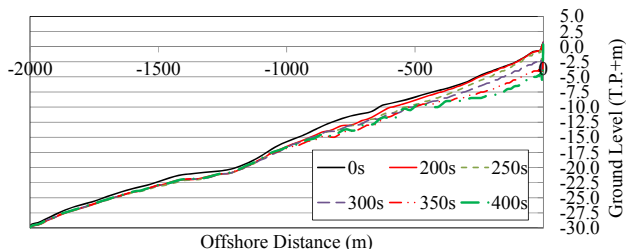


図-6 沖合の侵食状況計算結果 (引き波)

場合、基礎工前面地盤高が基礎工下端高と同じ T.P.-1.0m まで侵食されると、滑動・転倒・円弧滑り、いずれの安定照査でも安全率が 1 を下回る結果となることから、引き波時の護岸前面地盤の侵食により護岸が倒壊に至ったと考えられる。現地調査より倒壊した護岸の流出位置も沖合であり、引き波での最終的な破壊を示唆しており、今回の結果と一致する。

4. 主要な結論

東北地方太平洋沖地震津波を対象に、津波の越流により生じた大規模な地形変化状況の分析と数値波動水路による引き波時と押し波時の津波挙動の計算と地形変化モデルで侵食の検討を行った。その結果、地形変化状況の分析から、護岸および海浜部に加えて、沖合海底地形も津波による顕著な侵食を受けたことがわかった。また、

津波及び地形変化の数値計算結果から、対象海岸では、押し波・引き波両方で侵食が生じており、両方の影響を受けて護岸が不安定になり、最終的には引き波時に倒壊に至ったと考えられる。

津波により侵食された土砂は沖合および陸上へ流出したと考えられるが、沖合に流出した土砂は深浅測量結果および数値計算結果より通常の波浪では戻り得ない水深 10m 以上の深い区域に流出した可能性がある。陸上部への堆積については、現在、顕著な堆積箇所は確認できていない。

謝辞：本論文の作成にあたり、宮城県気仙沼土木事務所および気仙沼市より貴重なデータの提供を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 永澤 豪, 田中 仁: 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, 2012.
- 2) 永澤 豪, 田中 仁: 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, 2013.
- 3) 土木学会水理委員会: 水理公式集 平成 11 年版, 丸善, 713p., 1999.
- 4) 大久保陽介・熊谷健蔵・辻尾大樹・永澤 豪・加藤史訓: 津波越流時における海岸堤防の洗掘に関する数値解析モデルの構築, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_991-I_995, 2014.
- 5) 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔: 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., 1999.
- 6) Rubey, W. W. : Setting velocities of gravel, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol.25, pp.325-338., 1933.

(2015.3.18 受付)

ANALYSIS OF THE GEOMORPHIC CHANGE AROUND THE STRUCTURES DUE TO THE TSUNAMI

Tsuyoshi NAGASAWA, Hitoshi TANAKA

The Geomorphic change due to the overflow of the tsunami have the great impact to the stability of the coastal structure and washout the beach which is excel in the aspects of both the environment and the usage for recreation. Even in these days, over the half swimming beach could not start again because of the erosion due to the tsunami in the disaster area. In this study, the effects of the geomorphic change due to the overflowing tsunami on the stability of the structures were estimated by using the two-dimensional numerical wave flume coupled with the analysis model of the geomorphic change. In the result, it is thought that the erosion due to both the rushing and receding wave cause the instability of the revetment and then the revetment was destroyed when the tsunami rush back to the sea in the end. Moreover, the survey data and the results of the numerical simulations suggested the possibility of the washout to the offshore areas of the eroded sand due to the tsunami.