離岸堤周辺における津波発生前後の 漂砂環境変化

森 文章¹・三戸部 佑太²・田中 仁³

¹ 学生会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: mori@kasen.civil.tohoku.ac.jp

² 正会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: y_mitobe@kasen.civil.tohoku.ac.jp

³ フェロー会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: tanaka@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

東日本大震災津波により仙台北岸において漂砂環境が変化している。同海岸における津波発生後の漂砂環境の実態を明らかにするために空中写真を用いた解析を行った。津波発生後、汀線は大きく後退しており離岸堤背後のトンボロが消失した。2009年から現在に至る空中写真から汀線を抽出し、経験的固有関数法による解析を行った。第一成分と第二成分の寄与率の合計は70%を超えており、支配的な成分であるといえる。第一成分は岸沖漂砂、第二成分は沿岸漂砂に起因すると考えられる。岸沖漂砂に起因する成分は津波発生前後で大きな汀線変動の変化はみられなかったが、沿岸漂砂に起因する成分は離岸堤周辺で変化がみられた。この変化があった沿岸漂砂について、汀線変動を抽出することで津波発生前後において沿岸漂砂の変化について評価した。

Key Words : tsunami, aerial photograph, empirical orthogonal function, detached breakwaters, shoreline

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は東北地方を中心に甚大な被害を及ぼし、特に砂浜海岸が多い仙台北岸では津波により大きな地形変化をもたらした。大規模かつ急激な地形変化による海岸浸食等が原因により沿岸構造物が与える漂砂環境は津波発生前後で変化していると考えられる。漂砂環境の変化は海岸堤防等の海岸保全施設や新たな防災計画を整える上で問題となる。このような問題は今後の巨大地震に伴う津波の影響を受ける海岸においても対策が必要となる。

本研究では漂砂を制御する効果を持つ離岸堤周辺の地域に着目した。離岸堤は沿岸漂砂を保留する機能が大きく海岸浸食防止工法として優れているばかりでなく、静穏な海面を確保することができるため海水浴場やその他多目的な利用が可能となる。離岸堤の設置においては沿岸漂砂量や海浜地形等の自然条件や離岸距離等を十分に検討して設計され、設置後も汀線変化を調査し十分な機能を発揮しているかを確認することが必要となる。藤原らは離岸堤の設置の際に試験施工により調査を行った後、離岸堤設置後の汀線変化の調査も行っている。本研究の対象海岸においても沼田・高橋²⁾が離岸堤設置後

の汀線変化の調査を行っている。しかし、東日本大震災津波により地形変化が起これ、津波発生前後で離岸堤周辺の土砂収支に変化が生じていると考えられる。そこで、本研究では空中写真解析をもとに津波発生後における離岸堤周辺の地形変化過程について検討した。

2. 研究対象・方法

本研究では宮城県仙台市に位置する仙台北岸のうち離岸堤を中心とした約4.5 kmの範囲を対象とした(図-1参照)。この海岸では海岸浸食を防ぐ目的で1976年から離岸堤工事が行われ、現在では6基の離岸堤が設置されている。この離岸堤により離岸堤背後では土砂が堆積し、トンボロが形成されている。また、仙台北岸全域において沿岸漂砂の卓越方向は北向きであり、離岸堤より南側で土砂が堆積し、北側で浸食される傾向にある。

本研究では津波発生以前から約1~2ヶ月に1度の頻度で撮影されている空中写真を用いて解析を行った。津波発生前の2009年3月から2015年1月までの空中写真から汀線を抽出し、津波発生前後における漂砂系の変化について検討した。なお、津波発生直後である2011年3月12日は国土地理院により撮影された空中写真を用い

た。抽出した汀線位置の補正については潮位と wave run-up を考慮した。潮位は標高 0 m を基準とし、各空中写真の撮影時刻における潮位に基づいて潮位補正を行った。2009 年から 2010 年及び 2013 年から 2015 年は鮎川港における観測潮位を用いたが、津波直後である 2011 年から 2012 年は観測潮位が存在しないため、鮎川港における天文潮位を用いた。wave run-up の補正は次式で求め、勾配を乗じることにより波の遡上距離を算出し補正を行った。

$$\frac{R}{H_0} = \xi_0 \quad (1)$$

ここで、 R は遡上高、 H_0 は沖波波高（有義波高）、 ξ_0 は surf similarity parameter である。ただし、波高データが存在しない期間については波高データが存在する期間における遡上距離の平均値を用いた。

3. 解析結果

(1) 汀線変化

各側線における汀線位置の時間変化を図-2 に示す。離岸堤南側(3000 m~4500 m)では、2011 年 3 月 11 日から 2011 年 3 月 12 日の汀線後退量は 10 m 程度であり、津波による影響は少ないと考えられる。また、津波発生前（2009 年 3 月~2011 年 3 月 11 日）と津波発生後（2011 年 3 月 12 日~2015 年 1 月）の汀線変動には特徴的な変化はみられなかった。離岸堤背後(2000 m~3000 m)では、津波発生前の汀線は緩やかな前進傾向にあり、このことはトンボロの成長を表している。津波の影響により離岸堤背後における汀線は一時的に後退したが、汀線は徐々に前進し、

図-1 対象領域

現在の汀線変動は安定していると考えられる。離岸堤北側(0 m~2000 m)では、2011 年 3 月 11 日から 2011 年 3 月 12 日において汀線は 10 m 程度後退しており、その後は長期的に後退傾向を示している。

各側線から津波発生前後の汀線変化率 $a(\text{m/year})$ を最小自乗法により下記のように定義し、平均的な汀線変化率を図-3 に示す。

$$y_s = at + b \quad (2)$$

ここで、 y_s は汀線位置、 a 、 b は最小自乗法によって決まる係数、 t は撮影日であり、 $a > 0$ のとき汀線は前進傾向を示し、 $a < 0$ のとき汀線は後退傾向を示している。離岸堤南側では、津波発生後における汀線前進速度は津波発生前に比べ減少している。3000 m~4000 m において汀線は長期的に安定している一方で、4000 m~4500 m は汀線が後退傾向を示している。離岸堤北側では、津波発生前の

図-2 各側線の汀線位置の変動。

(a)離岸堤南側, (b)離岸堤背後, (c)離岸堤北側

図-3 汀線変化速度

汀線は後退傾向を示している領域があるものの、長期的にみると汀線は安定していると考えられる。津波発生後の汀線は明らかな後退傾向を示している。津波発生前の同海岸における汀線変動の研究は数多く行われており、本研究における津波発生前の前進・後退傾向はほぼ一致している³⁾。

(2) 経験的固有関数解析

汀線位置について経験的固有関数(EOF)解析を津波発生前と発生後に分けて行うことにより津波発生前後における汀線変動の特徴を抽出した。この解析方法は汀線位置 $y(x,t)$ の時空間分布を空間の固有関数 $e_n(x)$ と時間の固有関数 $c_n(t)$ の積で表す、主成分分析の一種であり、これらの固有関数はデータを基に経験的に決定される⁴⁾⁵⁾。本研究では平均汀線位置からの距離とし次式のように表す。

$$y^*(x,t) = y_s(x,t) - \bar{y}_s(x) = \sum_{n=1}^k c_n(t) e_n(x) \quad (3)$$

表-1 第三成分までの寄与率(%)

	第一成分	第二成分	第三成分
津波発生前	50.0	21.2	7.7
津波発生後	57.4	21.5	5.8

図-4 津波発生前の第一成分の空間関数 $e_1(x)$ と時間関数 $c_1(t)$

ここで、 $y^*(x,t)$ は平均汀線からの変動量、 $\bar{y}_s(x)$ は平均汀線、 $c_n(t)$ は各モードにおける時間関数、 $e_n(x)$ は各モードにおける空間関数、 n はモード数である。なお、平均汀線は津波発生前の汀線変動の平均値を用いた。また各成分の寄与率 R_n は対応する固有値 λ_i から次式のように計算できる。

$$R_n = \lambda_n / \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (4)$$

固有関数 $c_n(t)$ と $e_n(x)$ は寄与率 R_n の大きい順に第一成分： c_1, e_1 、第二成分： $c_2, e_2, \dots$ と呼ぶこととする。

津波発生前後それぞれの成分の寄与率を表-1 にまとめた。津波発生前後ともに第二成分までの寄与率の合計は70%を超えており、第二成分と第三成分の差が大きい。したがって、本研究では第二成分までの解析を行った。

津波発生前について、図-4、図-5 に第一成分と第二成分の空間関数 $e_n(x)$ と時間関数 $c_n(t)$ を、図-6 に変動成分 $y_n(x,t) = e_n(x) c_n(t)$ を示す。第一成分の空間関数 $e_1(x)$ は全領域で正である。第一成分の変動量 $e_1(x) c_1(t)$ をみると時間関数 $c_1(t)$ の変化に応じて汀線全体が前進・後退していることがわかる。このことは高波浪時に汀線が前進、低波浪時に汀線が後退していると考えられる。第二成分の空間関数 $e_2(x)$ は離岸堤南側で正、北側で負である(図-5 参照)。また、時間関数 $c_2(t)$ はほぼ単調に増加している。

図-5 津波発生前の第二成分の空間関数 $e_2(x)$ と時間関数 $c_2(t)$

図-6 津波発生前の変動量 $e_n(x) c_n(t)$ 。(a)第一成分、(b)第二成分

図-6(b)によると、離岸堤南側で汀線が前進、離岸堤北側で汀線が後退しており、離岸堤の左右で汀線の前進・後退が入れ替わっていることがわかる。これは離岸堤が南からの沿岸漂砂を遮断するため、南側では汀線が前進し、北側では後退することに対応している。したがって、第二成分は沿岸漂砂が離岸堤で捕捉され離岸堤南側で汀線が前進、北側で後退することを表している。仙台北岸における過去の研究報告でも岸沖漂砂に起因する成分の空間関数は全領域で正値が分布しており、また沿岸漂砂に起因する成分は離岸堤の前後で空間関数の正負が入れ替わっている⁹⁾。

津波発生後について、図-7、図-8に第一成分と第二成分の空間関数 $e_n(x)$ と時間関数 $c_n(t)$ を、図-9に変動成分 $y_n(x, t) = e_n(x)c_n(t)$ を示す。第一成分の空間関数 $e_1(x)$ は全領域で正である。このことは津波発生前の第一成分と同様に時間関数 $c_1(t)$ の変化に応じて汀線が前進・後退することを意味する。第二成分の空間関数 $e_2(x)$ は離岸堤背後で負の値が大きく、北側では正である。時間関数 $c_2(t)$ は2013年7月までほぼ単調に減少し、その後の変動は小さい。図-9(b)によると、離岸堤の背後で汀線が前進しており、離岸堤北側で汀線が後退している。津波発生によりトンボロが消失したことを考えれば、第二成分は離岸堤が南からの沿岸漂砂を捕捉することによる新たなトンボ

ロの発達過程を表していることがわかる。

(3) 第一成分と波浪条件の関係

津波発生前後の第一成分が時間関数の変動に伴う沿岸方向にほぼ様な分布であることから、第一成分の時間関数 $c_1(t)$ と波浪条件との関係を検討した。波浪条件を表すパラメータとして Sunamura・Horikawa⁷⁾による C_s 値を算出した。その定義を次式に示す。

$$C_s = \frac{H_0}{L_0} (\tan\theta)^{0.27} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{-0.67} \quad (5)$$

ここで、 L_0 ：沖波波長、 $\tan\theta$ ：海浜勾配、 d ：底質粒径である。また、既往研究において津波発生前では田中・鈴木⁸⁾が、津波発生後では西ら⁹⁾が同海岸で調査を行っており、底質粒径はほとんど変化していないことがわかっている。海浜勾配は波浪条件と底質粒径に依存し、それらの条件は津波発生前後で変化していないと考えられるため、津波発生前に調査された海浜勾配 $\tan\theta=0.11$ を使用した。波浪データとしては仙台北港におけるナウファスの有義波の日平均値を用いた。

津波直後の仙台北港における波浪データは欠損しているため、宮城県中部沖に設置されているGPS波浪計から

図-7 津波発生後の第一成分の空間関数 $e_1(x)$ と時間関数 $c_1(t)$

図-8 津波発生後の第二成分の空間関数 $e_2(x)$ と時間関数 $c_2(t)$

図-9 津波発生後の変動量 $e_n(x)c_n(t)$. (a)第一成分, (b)第二成分

仙台港における有義波を算出した。ここで、仙台港における波高を H_s 、宮城県中部沖における波高を H_{GPS} とする。津波発生前の2009年から2010年の期間におけるGPS波浪計と仙台港での波高の相関関係によると、仙台港での波高が大きくなるほどGPS波浪計の波高にばらつきがみられる(図-10参照)。これは各波浪データの位置情報による違いであり、宮城県中部沖から仙台港へ向かう波が半島によって遮られるためであると考えられる。波向きに宮城県中部沖における南向きの波を $\varphi = 0^\circ$ 、時計回りを正としたとき、 $0^\circ \leq \varphi < 100^\circ$ において波が半島によって遮られるため、波向きが $100^\circ \leq \varphi$ の波高のみを採用し、相関関係を調べた。相関係数は $R=0.86$ と非常に高い相関があることがわかる。この相関関係から最小自乗法による回帰式を用い、津波発生直後のGPS波浪計から仙台港における波高を算出した。

EOF解析から得られた約1~2ヶ月毎の第一成分の時間関数 $c_1(t)$ の値からその変化率 $\Delta c_1(t)/\Delta t$ を算出した。波浪条件から得られた C_s 値は時間関数 $c_1(t)$ と同様の期間で平均した $\bar{C}_s$ 値を用いた。この $\Delta c_1(t)/\Delta t$ と $\bar{C}_s$ の関係調べた(図-11参照)。図の破線は回帰式であり、相関係数は $R=-0.54$ である。津波発生前後の $\bar{C}_s$ 値と $\Delta c_1(t)/\Delta t$ の関係を

図-10 仙台港と宮城県中部沖における波高の相関関係

図-11 第一成分の時間関数と $\bar{C}_s$ との関係

みると、ばらつきはあるものの、概ね C_s 値が大きいときに浸食傾向を示している。 $\Delta c_1(t)/\Delta t$ と C_s 値の負の相関から第一成分は波浪条件に対応する岸沖漂砂に起因し、津波発生前後で岸沖漂砂による汀線変動傾向はほとんど変化していないことがわかる。

(4) 第二成分における汀線変動

津波発生前後において変化がみられた第二成分の時間関数 $c_2(t)$ から平均汀線変化率を最小自乗法により求め、この汀線変化率と空間関数 $e_2(x)$ との積により沿岸漂砂による汀線変動量を表す(図-12参照)。津波発生後において時間関数 $c_2(t)$ は2013年7月から減少傾向がほとんどみられないことから2011年3月から2013年7月までの汀線変化率を算出した。津波発生後において、離岸堤背後で汀線が前進方向へ汀線変化速度が5m前後変化しており、2011年3月から2013年7月の約2年半で新たなトンボロが形成されたと考えられる。また、4000m付近において正負が逆転している。この原因として、津波により5500m付近で消波ブロックが突出しており、このことは4000mより南側では沿岸漂砂により汀線が後退しているものと考えられる。

4. 結論

津波発生により離岸堤背後のトンボロは消失した。津波発生後、離岸堤北側では汀線が後退傾向にあるものの、離岸堤背後のトンボロは新たに発達している。EOF解析により第一成分は岸沖漂砂に起因し、第二成分は沿岸漂砂に起因すると考えられる。第一成分において津波発生前後での空間関数 $e_1(x)$ の特徴的な変化はほとんどみられず、空間的に岸沖漂砂に変化はない。また、第一成分の時間的な変化について検討するために波浪条件に関わる C_s 値を算出し、時間関数 $c_1(t)$ との関係を調べた。その結果、岸沖漂砂は津波発生前後において特徴的な変化はみられなかった。第二成分において津波発生前後で沿岸漂砂による汀線変動の変化がみられた。津波発生後の第二成分の空間関数 $e_2(x)$ は離岸堤背後で負の値が大きくな

図-12 第二成分の汀線変化速度

っていることが特徴的である。時間関数 $c_2(t)$ は2013年7月まで単調に減少し、その後は大きな変動はみられなかった。このことから津波発生後において、離岸堤により沿岸漂砂が捕捉されることでトンボロの回復過程を表す短期的な変動であることが確認された。現在では新たなトンボロの発達は終了したと考えられる。

謝辞：本研究に対して河川財団河川整備基金の補助を受けた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤原謙治, 木村弘, 園田泰敏: 修景型孔空離岸堤の汀線保全機能に関する現地検証, 海岸工学論文集, vol.50, pp.586-590, 2003.
- 2) 沼田淳, 高橋敏彦: 仙台市荒浜海岸における離岸堤築造前後の汀線変化, 海岸工学論文集, vol.30, pp.269-273, 1983.
- 3) 姜炫宇, 田中仁, 坂上毅: 長期現地観測資料に基づく仙台海岸汀線変動特性・土砂収支の検討, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.536-540, 2004.
- 4) 加藤一正, 吉松晃: 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号, pp.27-47, 1984.
- 5) 栗山善昭, 伴野雅之, 岸弘之, 佐藤敏文, 水内邦夫: 汀線変動モデルと経験的固有関数法を用いた潜堤背後の地形変化の検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, pp.I_561-I_565, 2012.
- 6) 永澤豪, 田中仁: 等深線距離を用いた三次元経験的固有関数展開による仙台北岸海浜変形解析, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.621-625, 2000.
- 7) Sunamura, T. and Horikawa, K.: Two-dimensional shore transformation due to waves, *Proc. 14th Conf. Coastal Engineering*, pp.920-938, 1974.
- 8) 田中仁, 鈴木正: 海浜粒度組成変化の予測モデル, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.511-515, 1998.
- 9) 西隆一郎, Julianti, M. Tommy, J. 林健太郎: 津波による第I砂丘部および海岸保全構造物背後の洗掘地形について, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_198-I_203, 2012.

ENVIRONMENTAL VARIATION OF SEDIMENT TRANSPORT DUE TO TSUNAMI AROUND DETACHED BREAKWATERS

Fumiaki MORI, Yuta MITOBE and Hitoshi TANAKA

Coastal area in Tohoku District was severely damaged by Tsunami which occurred on March 11th, 2011. Sendai Coast is one of the sandy coasts that has been affected by the devastating tsunami. This study focusses on Arahama Coast, a part of Sendai Coast. Shoreline variation is obtained from pre- and post-tsunami aerial photographs. It is found that after the tsunami, shoreline behind six detached breakwaters has been advancing, while shoreline in the northern area of the detached breakwaters has been retreating. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis is applied to decompose shoreline positions. According the present analysis, the first mode expresses cross-shore component and the second mode longshore component. The cross-shore component is not so different between pre-tsunami and post-tsunami, while the longshore component is highly different between these two periods.