津波による砂浜・河口砂嘴決壊とその回復過程に関する研究

Breaching of Sandy Coast and Spit Due To The 2011 Tsunami and Their Recovery

平尾隆太郎¹・田中 仁²・梅田 信³・Mohammad Bagus ADITYAWAN⁴
真野 明⁵・有働恵子⁶

Ryutaro HIRAO, Hitoshi TANAKA, Makoto UMEDA, Mohammad Bagus ADITYAWAN
Akira MANO and Keiko UDO

This study highlights recovery of sandy coasts and river mouths in Miyagi Prefecture after severe erosion due to The 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami, based on a field investigation and aerial photograph analysis. It is found that the duration required for morphology recovery is highly dependent on the length of surrounding sandy coast supplying sediment. In addition, one-line model is applied to reproduce this recovery process. Although complete agreement cannot be achieved as compared with the measurement, qualitative agreement is obtained for the relationship between the recovery time and the ratio between the length of sandy coast and the breaching width. The findings of this study may be useful for preparing for tsunami disaster prevention and preparedness.

1. はじめに

波動による漂砂現象のうち水面下で生じる現象については多くの研究がなされているが、ドライな砂面を越流する流れによる地形変化に関しては研究事例が限られている(例えば, Kobayashiら, 1996; Donnellyら, 2006). 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波も仙台湾の海浜・河口砂嘴を越流し, 大規模な地形変化をもたらした. ただし, 津波の場合には越流時のみならず, 戻り流れの影響も甚大であることが指摘されている. このような2011年東北地方太平洋沖地震津波による地形変化について, 著者らがすでに報告を行っている(田中ら, 2011; 平尾ら, 2012). しかしながら, 津波の発生頻度が極めて低いことから, 津波来襲後の地形回復過程について十分な知見が得られていないのが実情である. このような背景から, 津波来襲から約一年が経つ現在でも河口地形変化の残存により, 治水安全度の低下が懸念されているにもかかわらず, 今後の地形の変化や新たな平衡海浜形状に関する地形が極めて不足している箇所が多く見られる.

そこで, 本研究においては, 宮城県仙台湾岸および同石巻海岸を対象に空中写真による汀線変化の解析を行い, 地形変化とその回復過程, 特に地形回復に要する時間がサイトにより異なることを明らかにした. また, そ

の相違を説明するために, One-Lineモデルによる数値計算を行った.

2. 研究対象

本研究における研究対象領域を図-1に示す. 対象河川は, 北から順に, 鳴瀬川, 七北田川, 名取川である. さらに, 河川ではないもの, 津波の影響により砂浜が決壊し, 一時的に河口・ラグーン地形を呈した仙台市荒浜海岸・岩沼市赤井江も研究対象としている.

鳴瀬川は宮城・山形県境の船形山を源とし, 鹿島台町より吉田川と併流の後, 河口付近で合流し石巻湾に注ぐ幹川流路延長89km, 流域面積1,133km²の一級河川である. 鳴瀬川河口部周辺は明治初期に大規模港湾計画「野蒜築港」が進められた場所であり, 河口左岸に位置する東松島市浜市には当時を偲ぶ遺構が残されている. 河口には二本の導流堤がある.

七北田川は宮城県仙台市に位置し, 幹川流路延長45km,

図-1 研究対象河口・海浜

1 正会員	修(工)	JR東日本本社建設工事部
2 フェロー	工博	東北大学工学研究科教授 土木工学専攻
3 正会員	博(工)	東北大学大学院准教授
4 正会員	Ph.D.	東北大学工学研究科PD 土木工学専攻
5 フェロー	工博	東北大学災害科学国際研究所教授
6 正会員	博(工)	東北大学災害科学国際研究所准教授

流域面積229.1km²の二級河川である。河口左岸には蒲生干潟があったが、東北太平洋沖地震津波によりラグーンと海を隔てる砂浜が完全に決壊し、以前の干潟内に砂が持ち込まれている。

名取川は水源を山形県境の神室岳に発し、広瀬川などの支川と合流しつつ、宮城県のほぼ中央部を横断して名取市関上で太平洋へと注ぐ一級河川である。流域面積939km²、幹川流路長55kmの規模がある。鳴瀬川と同様に、河口には二本の導流堤がある。

荒浜海岸は名取川と七北田川のほぼ中央部に位置する砂浜海浜で、仙台市内唯一の海浜浴場でもある。荒浜海岸においては背後の海岸公園整備事業の一環として1976年から海岸の維持を目的とした離岸堤工事が進められており、現在までに6基が設置されている。離岸堤は、長さ120m、開口部60m、設置水深2～4m、離岸距離170～200mである。

赤井江は仙台空港より南に約2.5kmに位置する。以前は海域と連結する潟湖であったが、その後、海域からは分離され、低平地からの排水は貞山運河を通じて名取川と阿武隈川を経て、海に注いでいたが、津波により砂丘部の決壊が生じた。

3. 各調査地点での砂浜・河口砂州の回復過程

(1) 鳴瀬川における地形変化

鳴瀬川における汀線変化を図-2に示す。津波により左岸砂州がフラッシュされた後、砂州の回復が見られない。もっとも最近に河口右岸から撮影された河口の状況が図-3に示されており、図-2に示された津波来襲直後の地形から変化が見られない。これは、河口に対する沿岸漂砂供給源の砂浜が河口左岸のL形ヘッドランドまでしか存在せず、沿岸漂砂による砂の供給がきわめて限定されることによると考えられる。

図-3 鳴瀬川河口 (2012年3月30日)

(a) 2011年4月14日

(b) 2011年5月9日

(c) 2011年6月9日

図-2 鳴瀬川における河口地形の変化

(a) 2011年3月6日

(b) 2011年3月12日

(c) 2011年6月8日

(d) 2011年7月6日

(e) 2011年9月7日

図-4 七北田川における河口地形の変化

(1) 七北田川における汀線回復

七北田川における汀線変化を図-4に示す。侵食された砂嘴部の区間 (B) が徐々に回復するのに対し、これをはさんで左右の区間 (A), 区間 (C) が侵食されている。

すなわち、左右の区間 (A), (C) の部分を削って、中央の凹部を埋め戻していることが確認される。このような砂の供給源の存在により、上記の鳴瀬川と異なり、比較的早く回復が生じている。

ここで、図-4より七北田川における汀線位置 y_s を読み取り、その変化を図-5に示した。ここに示す二つの測線のいずれも同様な変化傾向を示している。これより、汀線の回復に要した時間は180日であった。

(a) 七北田川

(b) 名取川

(c) 荒浜海岸

(d) 赤井江

図-5 汀線位置の変化

図-6 河口地形の模式図

なお、その後、七北田川においては出水時の新たな河口の形成、人工開削による開口部の付け替えなどが行われている (田中ら, 2012)。

(2) 名取川における汀線回復

名取川における河口地形の変化については、Tanakaら (2012) により空中写真の画像をもとに報告がなされている。基本的には図-4(a) に示した七北田川と類似した汀線変化が生じており、図-2、図-3に示された鳴瀬川と大きく異なるものであった。

そこで、これらの空中写真から汀線位置を読み取り、七北田川と同様に汀線位置の変化を図-5(b) にプロットした。その結果、名取川の回復には196日かかっていることが判明した。この回復時間は七北田川のそれに類似したオーダーである。

(3) 荒浜海岸における汀線回復

荒浜海岸においては旧川位置において砂浜の決壊が生じた (田中ら, 2011)。その後の汀線の回復については、Tanakaら (2012) により空中写真の映像をもとに報告がなされている。荒浜海岸に対しても同様に図-5(c) にプロットした。その結果、荒浜海岸における回復には20日かかっており、上記二河川にくらべてはるかに短い期間であることが分かる。

(4) 赤井江における汀線回復

赤井江における汀線位置変化を図-5(d) に示した。赤井江では、津波の戻り流れにより旧川跡に開口部が形成された。急速に地形が回復しており、要した時間は80日であった。赤井江では左右岸にはそれぞれ、6.2kmおよび0.7kmの砂浜が続いており、長大な埋め戻し土砂の供給源が存在する。これが、地形回復時間の短さを生んでいると考えられる。なお、同所における海浜地形の過程は、One-Line modelにより計算がなされており、凹部の海浜変形に対する解析解 (Larsen et al., 1987) と良好な一致を示すことが示されている (平尾ら, 2012)。

4. 考察

(1) 回復に要する時間 T と L/B の関係

上述の様に、箇所に応じて回復時間に大きな相違が見られ、その要因は、周辺海浜からの砂の供給可能量の大小であると推測される。そこで、図-6の様に、 $L (= L_1 + L_2)$: 土砂供給源の海浜長さ、 B : 侵食された凹部の長さ、 T : 地形回復に要した時間と定義し、上記の空中写真解析により得られた地形回復までの時間 T と L/B の関係をまとめた。

結果を図-7に示す。これより、侵食幅 B に比べて供給源 L が短いほど、長い時間を要し、 L/B が大きいほど早い回復を示していることが確認される。

(2) One-Line モデルによる検討

海浜地形の特性による回復時間の違いを検証するため、汀線変化モデルによる数値計算を行った。基礎式は次式である。

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} + \frac{1}{D} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 y_s : 汀線位置、 Q : 沿岸漂砂量、 D : 漂砂の移動高さ、 t : 時間、 x : 沿岸座標である。

ただし、式(1)の解は無限長を有する海浜での変形であるために、図-6に示した「土砂供給源砂浜幅」の概念を適用することは出来ない。そこで、ここでは数値計算による検討を行い、その際に、図-6の様に模式化された凹部を想定し、 $L (= L_1 + L_2)$ を変化させて計算を行い、平衡状態の海浜に至るまでに要した時間 T を算出した。ここでは、凹部中心に生じる最終的な汀線変化量 Δy_s の

95%に至るまで時間を T とした。ここで、 Δy_s は次式で与えられる。

$$\Delta y_s = \frac{y_0 (L_1 + L_2)}{L_t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

その結果を、図-8に示す。ここで、無次元時間は次式で定義される。

$$T^* = \frac{T}{L_t^2 / \varepsilon} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、無次元の汀線後退量 y_0^* は次式で定義されている。

$$y_0^* = \frac{y_0}{L_t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L_t : 次式の様に河口と砂浜を合わせた全長である。

$$L_t = L_1 + L_2 + B \quad \dots\dots\dots (5)$$

計算結果は、図-7に示した実測値と同様に右下がりの傾向を示すことが確認された。また、 T^* は初期に与えられる凹部の高さ y_0^* にはほとんど依存していないことが分かる。ただし、現地で得られている漂砂量係数 K などを用いて、有次元に戻した際に定量的な一致は十分ではなかった。この理由としては、例えば図-4に示した海浜において局所的に離岸堤の設置された箇所があり、上記の簡単なモデルでは表現しきらないことなどが挙げられる。また、漂砂区間の端部として海域に突出した下水処理場排水口導流堤などを用いているが、そこでの漂砂の透過がゼロではないことなども理由として考えられる。

図-7 河口地形と回復に要する時間の関係 (実測値)

図-8 河口地形と回復に要する時間の関係 (計算値)

5. おわりに

本論文においては、津波による地形変化とその回復過程に関する検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- (1) 周辺の漂砂環境の相違によって、津波により決壊した海浜の回復時間が大きく異なることが示された。この相違を支配する要因は、凹状の決壊地形に対して、周辺から沿岸漂砂により供給が出来る砂の量の多寡であることが明らかになった。
- (2) One-Lineモデルを用いた数値計算より、津波により形成された凹状海浜決壊の回復に要する時間を求め、実測値と同様な傾向を示していることを明らかにした。
- (3) 今後の津波防災計画の立案に際し、砂浜の被災とその後の回復について、本研究の知見は有益である。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所より鳴瀬川に関する資料の提供を受けた。さらに、本研究に対して日本学術振興会科学研究費（基盤研究（B）No.21360230，同No. 22360193，特別研究員奨励費No.2301367），（財）河川環境管理財団河川整備基金，および東北建設協会建設事業に関する技術開発支援の助成を受けている。ここに記して関係各位

に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 田中 仁・真野 明・有働恵子（2011）：2011年東北地方太平洋沖地震津波による海浜地形変化，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67, No.2, pp.I_571-I_575.
- 田中 仁・Mohammad Bagus Adityawan・真野 明（2012）：東北地方太平洋沖地震津波後の七北田川河口閉塞とその後の地形変化，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. B2-67, No.1.（印刷中）
- 平尾隆太郎・田中 仁・梅田 信・Nguyen Xuan Tinh・Eko Pradjoko・真野 明・有働恵子（2012）：東日本大震災津波後の河口地形変化の特徴と問題点，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68, No.4, pp.I_1735-I_1740.
- Donnelly, C., Kraus, N.C. and Larson, M. (2006): State of knowledge on measurement and modelling of coastal overwash, *Journal of Coastal Research*, Vol. 22, pp. 965-991.
- Kobayashi, N., Tega, Y. and Hancock, M.W. (1996), Wave reflection and overwash of dunes, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.122, No.3, pp.150-153.
- Larson, M., Hanson, H. and Kraus, N. C.: Analytical solutions of the one-line model of shoreline change, Technical Report CERC-87-15, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1987.
- Tanaka, H., Nguyen, X. T., Umeda, M., Hirao, R., Pradjoko, E., Mano, A. and Udo, K.: Coastal and estuarine morphology changes induced the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No.1, 2012.