津波により侵食された河口部のsink効果による周辺海浜での汀線後退 Shoreline Retreat due to Sink Effect in the Vicinity to a River Mouth Scoured by The 2011 Tsunami

Vo Cong Hoang¹・田中 仁²・三戸部佑太³

Hoang Vo CONG, Hitoshi TANAKA and Yuta MITOBE

The Great East Japan Tsunami in March, 2011 caused the significant changes of morphology on Sendai Coast. The flushing of sand spit in front of Nanakita River mouth and the breaching at Akaiko area can be observed. This study investigates the erosion of shoreline on the right side of Nanakita River mouth and the recovery of the breaching after the tsunami. Estimation of diffusion coefficient, which is an important parameter in numerical simulation of shoreline change, has been carried out for both study areas from measured data of erosional area propagation. These values of diffusion coefficient have been used to reproduce the erosion and the recovery of shoreline positions at study areas. The results show good agreement between the analytical result and measurement.

1. はじめに

沿岸域における土砂収支の評価のためには、沿岸漂砂量とともに漂砂系におけるsink, sourceについても把握しなければならない。このうち、sink効果の典型的な事例はtidal inletにおけるflood shoalの形成によるものである(例えば、FitzGerald, 1988; Kraus・Wamsley, 2003)。また、宇多(1997)は河口閉塞解消のための河口堆積土砂の漂砂系外への搬出がsink効果を強め、周辺の砂浜の侵食をもたらすことを指摘している。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は沿岸の各地に甚大な被害をもたらしたが、砂浜・河口砂嘴においては大規模な地形変化を生じさせた。特に仙台海岸においては、河口域に大きな地形変化が生じ、河口周辺に位置するラグーン水域が大きく侵食され、河口部を含めて凹形状の海浜が形成されるという共通した特徴的な海浜変形が見られた(田中ら, 2011; Tanakaら, 2012)。凹型地形は周辺砂浜に対してsinkとして作用し、新たな平衡状態に移行するための境界条件・初期条件として作用する。このため、凹型地形への砂の移動により、砂の供給源である周辺海浜には深刻な侵食が生じているものと考えられる。

そこで、本研究においては、空中写真による汀線変化の解析を行い、河口のsink効果による周辺海浜の侵食過程に関する解析を行い、周辺海浜と河口地形との相互関係を明らかにするとともに、ワンラインモデルにより定量的評価を行った。

2. 研究対象および使用データ

本研究においては、宮城県仙台海岸に注ぐ河川のうち七北田川の河口部を研究対象とした。また、厳密には河川ではないものの、津波の影響により砂浜が決壊して一時的に河口・ラグーン地形を呈した赤井江における旧川跡のブリーチ地形も研究対象としている。本論文における研究対象の位置図を図-1に示す。

仙台海岸における海浜地形の大きな特徴の一つは河口部にラグーン地形を有することである。これは、卓越す

図-1 研究対象の概要

1 学生会員 M.Sc. 東北大学大学院博士課程 土木工学専攻
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) 東北大学工学研究科助教 土木工学専攻

図-2 津波後の七北田川河口周辺の海浜変形

図-3 津波後に見られた七北田川右岸の汀線変化

図-4 七北田川河口右岸侵食域の拡大過程

る沿岸漂砂により河口部河道が直接的に海に注ぐことが出来ず、河口付近で汀線に平行な流路が形成され、その後、人工的な河口部の固定によりラグーン地形として残存したものである（田中，1995）。

3. 結果と考察

(1) 七北田川河口右岸海浜における侵食域の拡大

Google Earthから得られる七北田川河口部周辺における

汀線の変化を図-2に示す。津波により河口右岸の砂州が完全にフラッシュされたのみならず、蒲生干潟のラグーン地形と海域を隔てるバリアー地形も消失したことにより、幅が1,000mにも及ぶ凹型の海浜地形が形成されていることが分かる。このため、周辺海浜の砂が河口部に吸い込まれ、逆に砂の供給源である七北田川河口右岸および仙台港防波堤基部付近には侵食域が広がっていることが確認される。すなわち、侵食された河口部および蒲生干潟の凹型地形が沿岸漂砂系に対してsinkの役割を持ったことが分かる。

この様な凹型地形への沿岸漂砂供給過程をより詳細に確認するために、七北田川右岸における汀線の変化を拡大し、その時間変化を図-3に示した。津波の来襲前には図-2に見られるように北上する沿岸漂砂の影響により右岸砂州の発達が見られたが、津波により河口砂州が完全にフラッシュされた。その後、図-3に見られるように河口右岸の砂浜において侵食域の拡大が認められる。一方、河口内に輸送された砂は砂嘴を形成している。ただし、砂嘴の位置は津波来襲前に比べて大きく河道内に押し込まれた箇所となっている。東日本大震災津波後に同様な現象が他の多くの河川でも観察されている（田中ら，2013a）。

図-3の画像から津波発生後の七北田川右岸における侵食域先端部までの距離 x_e を読み取り、津波発生後の経過時間 t との関係を図-4に示している。この図より、侵食域の長さは時間の平方根に比例して増大していることが確認される。

なお、図-2の左端に見られる蒲生干潟より北側の仙台港防波堤に到る海浜についても侵食域の拡大に関して同様な検討を行ったが、図-4に見られた様な明瞭な関係は得られなかった。これは、この箇所に侵食防止のための離岸堤や大型土嚢が設置されていることなどによるものと考えられる。

図-2に示した地形変化の後に七北田川河口は完全に閉塞した。その後、出水により蒲生干潟内に開口したため、

図-5 赤井江周辺の汀線変化

図-6 赤井江右岸侵食域の拡大過程

(a) ステップ型地形

(b) 有限幅侵食地形

図-7 ワンラインモデルにおける初期地形

河口の付け替えが行われて地形が安定した。このような現在に到りより長期的な河口地形の回復過程に関しては田中ら (2014) に詳しい。

(2) 旧川跡 (赤井江) 周辺における侵食域の拡大

図-5には赤井江における地形変化を示す。赤井江は旧川の河口部であり、以前はこの箇所に河口が開いていた (田中ら, 2013b)。このため、これまでも大規模な洪水時にはこの箇所にbreachingが生じることがあった。2011年東日本大震災津波の際にはこの箇所が幅120mにわたり侵食され、海域と赤井江が連結された。その後、図-5に見られるように、この開口部は徐々に閉塞した。一方、開口部の両岸を見ると、やはり、図-3と同様に時間とともに侵食域が左右岸に徐々に拡大していることが分かる。

そこで、図-5をもとに図-4と同様に侵食域先端部の距離 x_e と津波発生後の経過時間 t との関係をプロットすると図-6を得る。図-4と同様に侵食域は $t^{1/2}$ に比例して拡大していることが確認される。

(3) ワンラインモデルによる考察

以下ではLarsonら (1987) によるワンラインモデルによる解析解を用い、上記の様な凹型地形周辺の汀線変化過程について考察を行う。

図-3および図-5に見られた初期地形を参考にして、図-7の二つの初期条件を与える。基礎方程式として拡散方程式をもとにして、図-7の初期条件に対する汀線変化はそれぞれ次の解析解で与えられる。

$$y(x,t) = -\frac{1}{2} Y_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$y(x,t) = -\frac{1}{2} Y_0 \left[\operatorname{erf}\left(\frac{a-x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a+x}{2\sqrt{\epsilon t}}\right) \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 y : 汀線位置、 Y_0 : ステップ型汀線の段差、または有限幅侵食部の岸沖方向長さ、 erfc : 余誤差関数、 erf : 誤差関数、 a : 侵食域幅の半分、 ϵ : 拡散係数、 x : 沿岸方向の座標、 t : 時間である。ただし、Larsonら (1987) の解は後退した汀線の位置を y 軸の原点としているが、ここでは後退する前の初期汀線を $y=0$ としているため、解の形が若干異なっている。

上記解のうち、式 (2) において Y_0 の符号を変えて凸型地形とすれば、矩形初期汀線の時間変化を示す解となる。この解は矩形の養浜がなされた後の地形変化・養浜区間内での土砂歩留まりの評価などに使用されている (Dean, 2003)。

以下では、式 (1) および (2) により、図-3から図-5に見られた侵食域の伝搬に関する考察を行う。式 (1)、式 (2) の理論解によれば、指数関数で表された解の特性から侵食域の長さ x_e は無限大である。そこで、以下では Y_0 の99%となる箇所をもって侵食域の長さとして定義する。類似した定式化は、同様な解の特性を有する境界層流れ

における境界層厚さの定義などにおいても一般的になされている扱いである（例えば、Sana・Tanaka, 2007）。

式（1）によれば、侵食域の伝搬特性の解として次式が得られる。

$$x_e = 3.3\sqrt{\varepsilon t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

あるいは、無次元距離および無次元時間

$$x_e^* = \frac{x_e}{Y_0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$t^* = \frac{\varepsilon t}{Y_0^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を導入することにより、

$$x_e^* = 3.3\sqrt{t^*} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表現される。

一方、有限幅侵食域に対する解である式（2）を用いれば、凹部左右岸に見られる侵食域の先端部までの距離 x_e の無次元表示は次式により与えられる。

$$\frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(-\frac{x_e^*}{2\sqrt{t^*}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{B^* + x_e^*}{2\sqrt{t^*}} \right) \right] = 0.99 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、図-5に示すように $x_e = x = a$ からの距離として定義されている。また、上式中の B^* は侵食幅 $B (=2a)$ をもとに次式で定義される。

$$B^* = \frac{2a}{Y_0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式（7）より得られる侵食域長さ x_e に関する解を図-8に図示した。 B^* が小さい時には、より短い時間で埋め戻しが終わるため、 x_e も短い。海浜変形が生じ始める当初は、たとえ有限幅侵食であっても右岸・左岸の事象は干渉し合わず、本質的にステップ型の海浜変形と同一の変形が生じることから、 B^* の増加とともに式（7）の解は式（6）に漸近する。また、 B^* の小さいケースでも、無次元時間の小さい間は式（6）に一致した振る舞いを示す。

先述の現地で見られた図-4、図-6に示された結果は、式（6）による解の特性とさわめて良好に一致していることが分かる。

この様な（拡散係数）×（時間）の平方根に比例する代表長さの存在は、熱伝導現象（例えば、Carslaw・Jaeger, 1959）、粘性流体（例えば、Schlichting・Gersten, 2000）、物質拡散現象（例えば、Crank, 1975）など拡散

型の方程式で記述される物理現象に共通するものである。同様な時間依存特性が海浜変形においても確認された点はきわめて興味深い結果である。

（4）拡散係数の推定

図-4、図-6に示された侵食域長さ x_e の実測値に最小二乗法を当てはめれば、式（3）の拡散係数 ε が得られる。その結果、図-4より $13.2 \text{ m}^2/\text{h}$ 、また図-6から $14.3 \text{ m}^2/\text{h}$ が得られ、二つの異なるサイトから得られた値はほぼ等しいものとなった。

一方、仙台海岸においては汀線変化シミュレーションから漂砂量係数が得られている（真野ら, 1996；菱ら, 2006）。これらの漂砂量係数と平均的な波浪特性から拡散係数を求めたところ、今回得られた値と近い値であることが確認された。

（5）ワンラインモデルによる計算結果

得られた漂砂量係数を用いて汀線変化の計算を行い、実測値との比較を行った。まず、赤井江に対する結果を

図-8 侵食域の伝搬に関する解析解

Date	Meas.	Eq.(2)
March 12 th , 2011	■	—
March 14 th , 2011	●	—
March 17 th , 2011	▲	—
March 24 th , 2011	▲	—
April 6 th , 2011	+	—
May 26 th , 2011	◆	—

図-9 ワンラインモデルによる解析解との比較(赤井江)

図-10 ワンラインモデルによる解析解との比較
(七北田川河口右岸)

図-9に示す。ここで、計算においては $B=120\text{m}$ 、 $Y_0=270\text{m}$ と与えて、式(2)を用いている。幾分のばらつきはあるものの、全体的に計算結果は実測と良好な一致を示している。

また、図-10は七北田川河口右岸海浜における比較を表す。ここで、計算には式(2)を用い、図-2をもとに $B=1040\text{m}$ 、 $Y_0=250\text{m}$ とした。ただし、 B が広いことから、計算結果は式(1)を用いた場合でも完全に一致していた。この計算についても、河口右岸侵食域で計算結果は実測と良好な一致を示している。ただし、河口内においては一致度が良好ではない。

4. おわりに

本論文においては、東日本大震災津波により砂州がフラッシュされた河口周辺の海岸侵食について検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- (1) 津波により河口部が大規模に侵食された後、周辺海浜において侵食域が拡大していくことが確認された。また、侵食区間長さは経過時間の平方根に比例して増加している。この結果は拡散型の方程式で記述される様々な物理現象に共通する特性であり、きわめて興味深い結果である。
- (2) 侵食部長さの経時変化に関する解析解より、拡散方程式の係数を得た。
- (3) 七北田川右岸および赤井江における全体的な汀線変化の傾向は、(2)で得られた拡散係数を用いた解析解により良好に表現された。
- (4) これまで漂砂量係数のキャリブレーションには実測汀線の再現計算が多用されているが、今回、新たな手

法が示された。

謝辞：本研究に対して、(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た。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

- 宇多高明 (1997) : 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p.
- 姜 炫宇・田中 仁 (2006) : 汀線変化モデルの漂砂量係数同定に及ぼす検証データの影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 556-560.
- 田中 仁 (1995) : 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, 第509号/II-30, pp. 169-181.
- 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・盧 敏・Vo Cong Hoang (2013a) : 東日本大震災津波後の河口砂州河道内侵入現象, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, pp. I_616-I_620.
- 田中 仁・Mohammad Bagus Adityawan・有働恵子・真野 明 (2013b) : 津波による旧川位置での河道形成と戻り流れの排水機能, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-69, pp. I_411-I_415.
- 田中 仁・三戸部佑太・Vo Cong Hoang (2014) : 津波による大規模海浜変形とその後の回復過程, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2. (印刷中)
- 真野 明・Muhammad Hasanudin・沢本正樹 (1996) : 沿岸漂砂量公式に用いる年平均波, 海洋開発シンポジウム論文集, 第21巻, pp.55-59.
- Carslaw, H. and J. Jaeger (1959) : Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, 510p.
- Crank, J. (1975) : The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., Clarendon Press, 414p.
- Dean, R. (2003) : Beach Nourishment -Theory and Practice-, World Scientific, 420p.
- FitzGerald, D. M. (1988) : Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets, in Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets (eds. D.G. Aubrey and L. Weishar), Vol.29, pp.186-225, Springer-Verlag.
- Kraus, N.C. and T.V. Wamsley (2003) : Coastal Barrier Breaching, Part 1: Overview of Breaching Processes, Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note, IV-56, Engineer Research Development Center (ERDC) /CHL.
- Larson, M., H. Hanson and N.C. Kraus (1987) : Analytical solutions of the one-line model of shoreline change, Technical Report CERC-87-15: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Sana, A. and H. Tanaka (2007) : Full-range equation for wave boundary layer thickness, Coastal Engineering, Vol.54, pp.639-642.
- Schlichting, H. and K. Gersten (2000) : Boundary-Layer Theory, Translated by Mayes, C., Springer, 801p.
- Tanaka, H., X.T. Nguyen, M. Umeda, R. Hirao, E. Pradjoko, A. Mano and K. Udo (2012) : Coastal and estuarine morphology changes induced the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No. 1.